

# **Memoria**

---

## **Proyecto de diseño de una red de sensores para monitorear al lince ibérico**

Titulación: Doble Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática y en Ingeniería Mecánica

Alumno: Miguel Martínez Núñez

Enunciado TFG: Proyecto de diseño de una red de sensores para monitorear al lince ibérico

Directores del TFG: Elisabet Amorós Casahuga y Carlos Gustavo Díaz González

Convocatoria del TFG: Primavera 2019

**Universidad Politècnica de Catalunya**

**ESEIAAT | Escuela Superior de Ingenierías Industrial, Aeroespacial y  
Audiovisual de Terrassa**

# Índice

Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1. Objeto.....	8
1.2. Justificación.....	8
1.3. Especificaciones básicas.....	8
1.4. Alcance.....	9
1.5. Estructura de la memoria.....	9
Capítulo 2. El lince ibérico.....	10
2.1. ¿Por qué el lince ibérico?.....	10
2.2. Fisiología, ecología y etología.....	11
2.3. Amenazas.....	17
2.4. Programas de conservación.....	18
Capítulo 3. Métodos de monitoreo.....	19
3.1. Alternativas consideradas.....	19
3.1.1. Análisis de ADN de huellas y rastros.....	20
3.1.2. Collares de rastreo.....	20
3.1.3. Fototrampeo.....	21
3.2. Selección de alternativa.....	23
Capítulo 4. Fototrampeo.....	24
4.1. Tipología de cámaras trampa.....	24
4.1.1. Sin accionamiento.....	25
4.1.2. Con accionamiento mecánico.....	25
4.1.3. Con accionamiento infrarrojo activo.....	26
4.1.4. Con accionamiento infrarrojo pasivo.....	26
4.2. Uso de señuelos.....	27
4.3. Redes de fototrampeo.....	28
4.4. Proyectos previos.....	29
4.4.1. TigerCENSE.....	29
4.4.2. Lince euroasiático.....	34
4.4.3. Jaguar I.....	34
4.4.4. Jaguar II.....	35
4.4.5. Lince ibérico.....	35
Capítulo 5. Diseño de la cámara trampa.....	38
5.1. Tipología de la cámara trampa.....	38
5.2. Características de la cámara trampa.....	39
5.3. Componentes de la cámara trampa.....	40
5.3.1. Sensor de imagen (cámara).....	41

5.3.1.1. Criterios.....	41
5.3.1.2. Alternativas.....	42
5.3.1.3. Solución escogida.....	43
5.3.2. Sensor infrarrojo pasivo (PIR).....	44
5.3.2.1. Criterios.....	44
5.3.2.2. Alternativas.....	44
5.3.2.3. Solución escogida.....	46
5.3.3. Fotorresistor.....	46
5.3.3.1. Criterios.....	46
5.3.3.2. Alternativas.....	47
5.3.3.3. Solución escogida.....	48
5.3.4. LED.....	48
5.3.4.1. Criterios.....	48
5.3.4.2. Alternativas.....	49
5.3.4.3. Solución escogida.....	50
5.3.5. Módulo de comunicación por radiofrecuencia.....	51
5.3.5.1. Criterios.....	51
5.3.5.2. Alternativas.....	52
5.3.5.3. Solución escogida.....	53
5.3.6. Batería.....	53
5.3.6.1. Criterios.....	53
5.3.6.2. Alternativas.....	54
5.3.6.3. Solución escogida.....	55
5.3.7. Convertidor de potencia.....	55
5.3.7.1. Requisitos.....	55
5.3.7.2. Solución escogida.....	56
5.3.8. Tarjeta de memoria.....	56
5.3.8.1. Solución escogida.....	57
5.3.9. Panel fotovoltaico.....	57
5.3.9.1. Criterios.....	57
5.3.9.2. Alternativas.....	58
5.3.9.3. Solución escogida.....	58
5.3.10. $\mu$ controlador.....	58
5.3.10.1. Criterios.....	58
5.3.10.2. Alternativas.....	59
5.3.10.3. Solución escogida.....	60
5.3.11. Lente.....	60
5.3.11.1. Criterios.....	60
5.3.11.2. Alternativas.....	61
5.3.11.3. Solución escogida.....	61
5.3.12. Carcasa.....	62
5.3.12.1. Alternativas de diseño.....	62
5.3.12.2. Alternativas de material.....	63

5.3.12.3. Solución escogida.....	63
5.4. PCB.....	64
5.5. Software.....	64
Capítulo 6. Instalación de la red.....	70
Capítulo 7. Conclusiones.....	71
Capítulo 8. Bibliografía.....	76

## Índice de figuras

Figura 1. Fotografía de un lince ibérico perteneciente al programa de conservación ex situ del lince ibérico [10].....	12
Figura 2. Temperatura diaria desde el 1 de junio de 2013 hasta el 1 de febrero de 2019 en la estación meteorológica de Almonte (Huelva) [14].....	13
Figura 3. Precipitaciones desde el 1 de junio de 2013 hasta el 1 de febrero de 2019 en la estación meteorológica de Almonte (Huelva) [14].....	13
Figura 4. Velocidad del viento desde el 1 de junio de 2013 hasta el 1 de febrero de 2019 en la estación meteorológica de Almonte (Huelva) [14].....	14
Figura 5. Territorio de buena calidad para el lince ibérico debido a la abundancia de matorrales maduros que le proporcionan refugio [13].....	14
Figura 6. Territorio de mala calidad para el lince ibérico debido a la escasez de roquedales y matorrales maduros, generando un paisaje incapaz de proporcionar refugio [13].....	15
Figura 7. Letrina de lince ibérico [15]. Utilizada como sistema de demarcación de territorio y mediante la cual se puede identificar si vive un lince ibérico en una área determinada.....	16
Figura 8. Huella de lince ibérico [15]. Abundante en los territorios donde viven.....	16
Figura 9. Área de distribución de lince ibérico en 2016 [16].....	17
Figura 10. Lince ibérico con collar de radiofrecuencia [26].....	21
Figura 11. Fotografía de lince ibérico tomada por una cámara trampa [15].....	22
Figura 12. Tipos de cámaras trampa según la tecnología de accionamiento.....	24
Figura 13. Cámara trampa diseñada en el proyecto TigerCENSE [24].....	29
Figura 14. Arquitectura de comunicación multihop.....	31
Figura 15. Diagrama de la cámara trampa diseñada en TigerCENSE [24].....	32
Figura 16. Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de cámara para cada criterio considerado.....	43
Figura 17. Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de sensor PIR para cada criterio considerado.....	45
Figura 18. Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de fotoresistor para cada criterio considerado.....	48
Figura 19. Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de LED para cada criterio considerado.....	50
Figura 20. Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de módulo de transmisión por radiofrecuencia para cada criterio considerado.....	53
Figura 21. Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de batería para cada criterio considerado.....	55
Figura 22. Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de $\mu$ C para cada criterio considerado.....	60
Figura 23. Arquitectura de comunicación en la cámara trampa diseñada.....	65
Figura 24. Funcionamiento de la función principal del $\mu$ C.....	66
Figura 25. Funcionamiento tras una interrupción por detección de lince ibérico.....	67

Figura 26. Funcionamiento tras interrupción por envío de datos.....	68
Figura 27. Funcionamiento tras interrupción por recepción de datos.....	69
Figura 28. Modelo de la cámara trampa diseñada.....	72
Figura 29. Modelo de la cámara trampa diseñada.....	73
Figura 30. Modelo de la cámara trampa diseñada.....	74
Figura 31. Modelo de la cámara trampa diseñada.....	75

## Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa entre las tres técnicas consideradas para monitorear poblaciones de lince ibérico.....	19
Tabla 2. Características de la cámara trampa diseñada en el proyecto TigerCENSE.....	33
Tabla 3. Criterios y sus respectivos pesos en la selección de sensor de imagen.....	42
Tabla 4. Valores de los criterios para cada alternativa de sensor de imagen o cámara.....	42
Tabla 5. Calificaciones y VTP de cada alternativa de cámara para cada criterio considerado.....	43
Tabla 6. Calificaciones y VTP de cada alternativa de sensor PIR para cada criterio considerado.....	44
Tabla 7. Valores de los criterios para cada alternativa de sensor PIR.....	45
Tabla 8. Calificaciones y VTP de cada alternativa de sensor PIR para cada criterio considerado.....	45
Tabla 9. Criterios y sus respectivos pesos en la selección de fotoreistor.....	46
Tabla 10. Valores de los criterios para cada alternativa de fotoreistor.....	47
Tabla 11. Calificaciones y VTP de cada alternativa de fotoreistor para cada criterio considerado.....	47
Tabla 12. Criterios y sus respectivos pesos en la selección de LED.....	49
Tabla 13. Valores de los criterios para cada alternativa de LED.....	49
Tabla 14. Calificaciones y VTP de cada alternativa de LED para cada criterio considerado.....	49
Tabla 15. Criterios y sus respectivos pesos en la selección de módulo de comunicación por radiofrecuencia.....	52
Tabla 16. Valores de los criterios para cada alternativa de módulo de transmisión por radiofrecuencia.....	52
Tabla 17. Calificaciones y VTP de cada alternativa de módulo de transmisión por radiofrecuencia para cada criterio considerado.....	53
Tabla 18. Criterios y sus respectivos pesos en la selección de batería.....	54
Tabla 19. Valores de los criterios para cada alternativa de batería.....	54
Tabla 20. Calificaciones y VTP de cada alternativa de batería para cada criterio considerado.....	54
Tabla 21. Dos alternativas consideradas en la selección de panel fotovoltaico.....	58
Tabla 22. Criterios y sus respectivos pesos en la selección de $\mu$ C.....	59
Tabla 23. Valores de los criterios para cada alternativa de $\mu$ C.....	59
Tabla 24. Calificaciones y VTP de cada alternativa de $\mu$ C para cada criterio considerado.....	59
Tabla 25. Dos alternativas consideradas en la selección de lente.....	61
Tabla 26. Características finales de la cámara trampa diseñada.....	71

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Objeto

El objeto del presente proyecto consiste en el diseño de una cámara trampa para formar una red de sensores de fototrampeo para monitorear poblaciones de lince ibéricos. La red está formada por nodos idénticos. El diseño de la cámara trampa, es decir, de los nodos de la red, se realiza considerando las características de los lince ibéricos y su hábitat, realizándose en su totalidad: electrónica y carcasa o armadura protectora.

## 1.2. Justificación

El lince ibérico es un felino endémico de la península ibérica y actualmente se encuentra en peligro de extinción. La base de cualquier estrategia de conservación radica en disponer de censos de poblaciones precisos, siendo el fototrampeo la técnica más adecuada para tal menester.

Sin embargo, a día de hoy, las cámaras trampa comerciales tienen poca autonomía, requieren de chequeos periódicos, ya sea para cambiar baterías, recoger datos o comprobar su correcto funcionamiento, y conllevan un coste considerable, especialmente a la hora de formar grandes redes sensoriales, con el fin de monitorear amplias extensiones de terreno. Igualmente, y pese a que existen una gran variedad disponibles en el mercado, las cámaras trampa comerciales no se adaptan a las características concretas del lince ibérico.

Es por ello que surge la necesidad de disponer de alternativas especializadas para el estudio de una especie en concreto, el lince ibérico para el presente proyecto, que mejoren las prestaciones que ofrecen los modelos comerciales.

## 1.3. Especificaciones básicas

La red de sensores debe ser capaz de determinar el número de ejemplares de lince ibéricos que viven en un territorio determinado de manera precisa. El sensor a diseñar debe ser de bajo consumo, con alta autonomía, no intrusivo, automático, fiable, robusto y económico. Se debe diseñar su parte electrónica y su parte mecánica, en otras palabras, el sensor debe quedar proyectado en su totalidad.



## **1.4. Alcance**

El proyecto abarca el estudio del lince ibérico y de su hábitat, la selección de la tecnología sensorial a utilizar, el diseño del sensor en base al comportamiento, fisiología y hábitat del lince ibérico y la metodología a seguir para formar una red con el sensor diseñado.

Queda fuera del alcance del proyecto estudiar o desarrollar métodos estadísticos para obtener los parámetros de población deseados o diseñar el software informático de tratamiento de los datos proporcionados por la red.

## **1.5. Estructura de la memoria**

La presente memoria se estructura como sigue: en el Capítulo 2 se realiza un estudio del lince ibérico; en el Capítulo 3 se detallan las diferentes técnicas que permiten monitorear y censar poblaciones y se selecciona la solución tecnológica más adecuada en base a las especificaciones previas; un estudio detallado del fototrampeo y posibles diseños es plasmado en el Capítulo 4; en el Capítulo 5 se diseña la cámara trampa; en el Capítulo 6 se ofrece la metodología seguir para la implementación en cualquier territorio de la red de sensores a partir de la cámara trampa; mientras que en el Capítulo 7 se ofrecen las conclusiones del proyecto.

## Capítulo 2. El lince ibérico

El lince ibérico, cuyo nombre científico es *Lynx pardinus*, es un felino endémico de la península ibérica, actualmente catalogado como “en peligro de extinción” por parte de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN)<sup>1</sup>.

A día de hoy, se estima que hay 589 ejemplares en estado salvaje distribuidos en diferentes poblaciones a lo largo de la península ibérica, según el último censo de población de lince ibérico datado a fecha de 2017 [1]. A pesar de que es una cifra todavía muy escasa, la población de lince ibérico ha aumentado considerablemente durante las dos últimas décadas, gracias a los programas de conservación llevados a cabo. En 2002, la especie registró mínimos históricos de población, cuando se estimaron menos de 200 ejemplares distribuidos en únicamente dos poblaciones aisladas entre sí: una en Doñana y otra en Andújar-Cardena [2]. Gracias al aumento de población, la IUCN rebajó en 2015 la categoría de protección de “en peligro crítico de extinción” a su estado actual “en peligro de extinción” [1], [3].

El capítulo se estructura como sigue: en la Sección 2.1 se explica la importancia de conservar a esta especie de felino, así como la necesidad de disponer de censos de población precisos; en la Sección 2.2 se detallan sus características físicas, hábitat y comportamiento, las cuales condicionan enormemente el método de monitoreo seleccionado; las principales amenazas que lo han puesto al borde de la extinción se describen en la Sección 2.3, y en la Sección 2.4 se ilustran los principales programas de conservación.

### 2.1. ¿Por qué el lince ibérico?

El lince ibérico (*Lynx pardinus*) es considerado una especie paraguas, ya que su conservación implica también, aunque de forma indirecta, la preservación de su hábitat y de la resta de especies que lo comparten [4]. Es un gran depredador, y esta afirmación no es meramente anecdótica, pues todo gran depredador ejerce un papel muy importante en su ecosistema controlando la abundancia de mesodepredadores<sup>2</sup>,

---

1 La IUCN clasifica a las especies de animales y plantas en función de su estado de conservación en las siguientes categorías: bajo riesgo, amenazada y extinta. Dentro de la categoría “amenazada” se encuentran las siguientes subcategorías: vulnerable, en peligro de extinción y en peligro crítico de extinción.

2 Un mesodepredador es un depredador de rango medio, que se alimenta de animales más pequeños que él.

disminuyendo así la presión en sus principales presas base, hecho que un primer momento puede parecer contradictorio.

Es considerado, a día de hoy, como el felino más amenazado del planeta [5], y su extinción supondría la primera de un felino desde que lo hiciera el tigre de dientes de sable (*Smilodon fatalis*) en el Pleistoceno<sup>3</sup>, hace más de diez mil años [1].

Por tanto, es de vital importancia, no solo evitar su extinción en primera instancia, sino también garantizar de que goce de buen estado de conservación en tiempos venideros, para obtener así un beneficio ecológico global, tanto para el lince ibérico, como para el hábitat y el resto de especies donde este vive.

La base de cualquier estrategia, plan o acción de conservación consiste en disponer de datos fiables de la población del animal a conservar, para así determinar si las estrategias de conservación que se aplican son las correctas [6]–[8]. Por lo que para una correcta preservación del lince ibérico se hace necesario disponer de métodos que permitan monitorear su población.

No obstante, las técnicas y métodos utilizados para monitorear a una especie dependen estrechamente de las características físicas, hábitat y comportamiento de la propia especie a monitorear. Por ello, antes de abordar las técnicas y tecnologías adecuadas para tal propósito, se hace necesario detallar estos tres aspectos del lince ibérico.

## 2.2. Fisiología, ecología y etología

El lince ibérico es un carnívoro de tamaño medio, con un peso medio de 12,5 kg y una longitud media de 80 cm [9]. Pertenece a la familia de los felinos (*Felidae*), y dentro de esta a la subfamilia *Felinae* y al género de los lince (*Lynx*). Tiene las características comunes de los lince: orejas con un mechón de pelos en su punta, también denominado pinceles; barba; cola corta con borlón negro en su extremo; llamativos ojos que le ofrecen una fina vista hasta en condiciones nocturnas; oída fina; y manos desproporcionadamente grandes con uñas retráctiles [9]. Vive de 10 a 15 años.

Su pelaje tiene un moteado que da a cada ejemplar de esta especie unas características únicas que permiten su identificación individualmente [8]. Su patrón de moteado funciona a modo de huellas dactilares, no hay dos individuos con mismo

---

<sup>3</sup> El Pleistoceno pertenece al período Cuaternario, de la era Cenozoica. Comienza hace 2,59 millones de años y finaliza en el 10 000 a. C.

patrón. Por ello, aquellos métodos que utilizan fotografías para censar poblaciones son capaces de identificar individualmente a cada ejemplar, lo que proporciona una elevada fiabilidad a los censos de población, una ventaja crucial debido al estado de conservación del lince ibérico [5].

Asimismo, las variedades de su pelaje se pueden clasificar en tres tipos: mota gruesa, mota intermedia y mota fina. A día de hoy, existen lince ibéricos con los tres tipos de moteado, especialmente desde que se producen refuerzos genéticos mediante intercambio de ejemplares entre poblaciones [9].

En la Figura 1 se observa a un ejemplar de lince ibérico perteneciente al programa de cría en cautividad que se lleva a cabo con la finalidad de obtener una reserva genética que garantice la supervivencia de la especie a largo plazo [1], en ella se pueden observar algunas de las características previamente descritas.

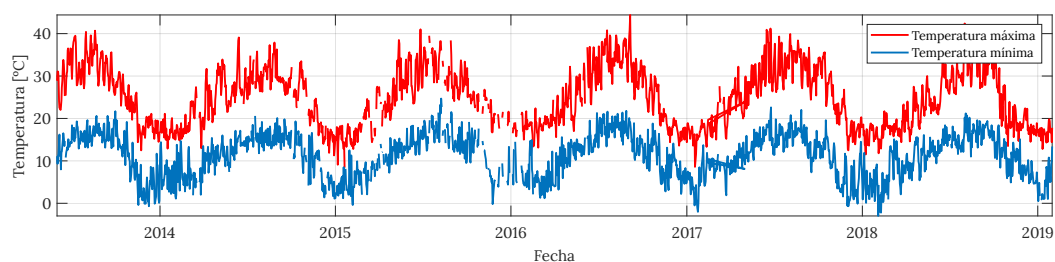


**Figura 1.** Fotografía de un lince ibérico perteneciente al programa de conservación *ex situ* del lince ibérico [10].

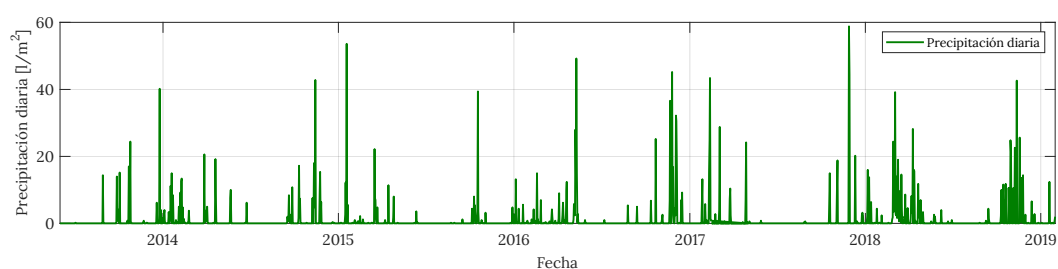
Desde un punto de vista genético, forma parte de la misma línea evolutiva que tigres, leones, jaguares y leopardos, de los que se separa hace 3 o 4 millones de años, estando más cerca de ellos evolutivamente que de un gato [9].

Su hábitat se reduce exclusivamente al bosque mediterráneo. Este tipo de hábitat se caracteriza por veranos secos y calurosos, inviernos fríos y húmedos y primaveras y otoños templados [11]. En las Figuras 2, 3 y 4 se hayan las temperaturas máximas y mínimas, las precipitaciones y las velocidades del viento, respectivamente, en la estación meteorológica de Almonte, en la provincia de Huelva, durante el último lustro. Dicha estación se encuentra situada en el parque nacional de Doñana, por lo que proporciona datos meteorológicos referentes al hábitat donde vive el lince ibérico. Los datos han sido obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Es una especie forestal que evita zonas abiertas y sin cobertura. El territorio donde vive está cuidadosamente seleccionado, puesto que es su unidad social básica [12]. Cada ejemplar adulto regenta un territorio de tamaño medio de 600 ha, aunque este tamaño puede variar según el sexo del animal y la calidad del territorio, manteniendo un mínimo de 300 ha [2] y un máximo de 2000 ha [13]. Es común que los territorios que regentan se solapen con los territorios de adultos de sexo contrario, y en menor medida, con los de su mismo sexo [9].

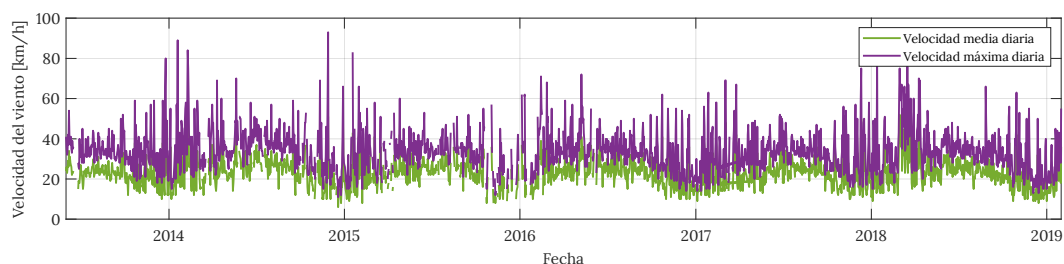


**Figura 2.** Temperatura diaria desde el 1 de junio de 2013 hasta el 1 de febrero de 2019 en la estación meteorológica de Almonte (Huelva) [14].



**Figura 3.** Precipitaciones desde el 1 de junio de 2013 hasta el 1 de febrero de 2019 en la estación meteorológica de Almonte (Huelva) [14].





**Figura 4.** Velocidad del viento desde el 1 de junio de 2013 hasta el 1 de febrero de 2019 en la estación meteorológica de Almonte (Huelva) [14].

Tienden a defender territorios de la mínima superficie posible que garantice alimento para subsistir [9]. Es por ello que cuanto mayor calidad tiene el territorio, entendiéndose por calidad el número de conejos disponible (su principal presa) y extensión de bosque mediterráneo en buena conservación, con abundancia de roquedales y matorrales maduros que le proporcionen refugio, menor es el territorio, ya que encuentran los recursos necesarios en menor superficie [9].

En las Figuras 5 y 6 se muestran un territorio de buena calidad para el lince ibérico, y uno de mala calidad, respectivamente.



**Figura 5.** Territorio de buena calidad para el lince ibérico debido a la abundancia de matorrales maduros que le proporcionan refugio [13].



**Figura 6.** Territorio de mala calidad para el lince ibérico debido a la escasez de roquedales y matorrales maduros, generando un paisaje incapaz de proporcionar refugio [13].

Delimitan los territorios donde viven mediante letrinas<sup>4</sup>, que son fácilmente detectables por su abundancia. También se encuentran huellas y rastros en demasía en dichos territorios, por lo que identificar un territorio regentado por un lince ibérico, pese a ser un animal esquivo para los seres humanos, es tarea sencilla.

En las Figuras 7 y 8 se observan una letrina y una huella de lince ibérico, respectivamente.

Sin embargo, existen ejemplares que, en edad senil, dejan los territorios que regentaban y se desplazan grandes distancias, de hasta 25 km diarios, para asentarse (o no) en nuevos territorios. Estos ejemplares en dispersión pasan más inadvertidos, ya que no conforman letrinas ni sistemas específicos de marcaje [9].

---

4 Zona del territorio del lince donde tiende a hacer sus heces, con la finalidad de que sirvan como señal de demarcación de su territorio.





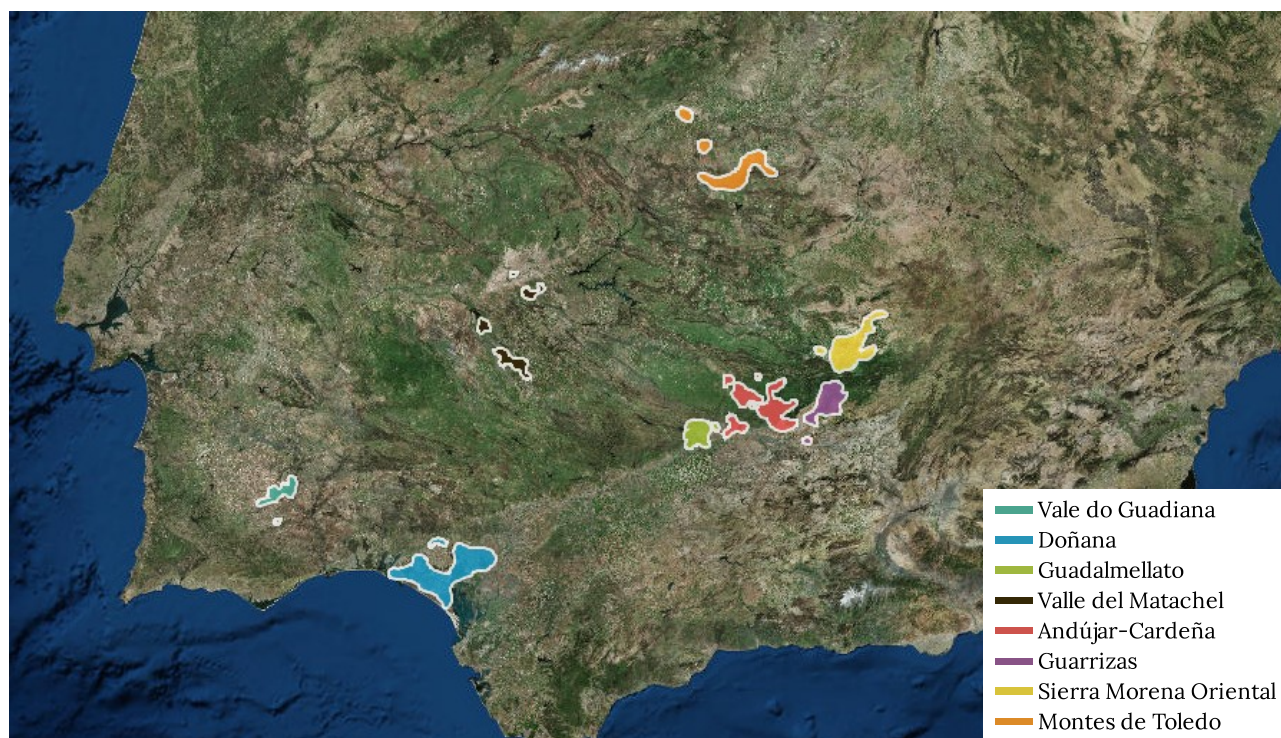
**Figura 7.** Letrina de lince ibérico [15]. Utilizada como sistema de demarcación de territorio y mediante la cual se puede identificar si vive un lince ibérico en una área determinada.



**Figura 8.** Huella de lince ibérico [15]. Abundante en los territorios donde viven.



Actualmente existen poblaciones de lince ibéricos en Vale do Guadiana, Doñana, Guadalmellato, Valle del Matachel, Andújar-Cardena, Guarrizas, Sierra Morena Oriental y Montes de Toledo [1]. En la Figura 9 se muestra en un mapa del sur de la península ibérica las distintas poblaciones de lince ibéricos existentes a día de hoy.



**Figura 9.** Área de distribución de lince ibérico en 2016 [16].

Por norma general, tienen actividad tanto diurna como nocturna; no obstante, su ritmo circadiano alcanza dos máximos en horas crepusculares: uno al amanecer y otro al atardecer [17], [18]. Así mismo, existen dos mínimos: uno durante el día, coincidiendo con las horas de máxima temperatura, y otro durante la noche.

Es un especialista de hábitat (bosque mediterráneo) y presa (conejo salvaje). Su dieta se compone de conejo casi exclusivamente [3]. Esta especialización tan extrema, pese a que le hace ser muy exitoso en territorios con bosque mediterráneo de calidad y con alta densidad de conejos, es lo que ha hecho situar a la especie al borde de la extinción [9].

## 2.3. Amenazas

La principal amenaza que ha causado la casi extinción del lince ibérico ha sido la disminución de su principal presa, el conejo [2]. En las últimas décadas, diversas

enfermedades víricas han provocado un descenso del 80% en las poblaciones de conejo [19].

La desaparición de hábitat bien conservado (que también ha afectado a la población de conejos) provocada por la destrucción y fragmentación debidas a la acción humana, así como la caza, han sido otros de los factores primordiales en su casi desaparición.

Además, debido al bajo número de linces ibéricos, es una especie con alto riesgo sanitario, por lo que cualquier brote infeccioso se podría dispersar con facilidad y extinguir una población local [19]. A esto se le suma una baja variabilidad genética, propia de la especie, que entre otros efectos negativos, ocasiona una pérdida de respuesta del sistema inmunológico [19].

## 2.4. Programas de conservación

El primero proyecto LIFE<sup>5</sup> de conservación del lince ibérico comenzó en 1994 y duró hasta 1999; no obstante, su finalidad no fue aplicar estrategias de conservación, sino vigilar y estudiar las áreas de linces ibéricos, con el objetivo de mejorar el conocimiento sobre las poblaciones, sus riesgos y amenazas, para poder aplicar, *a posteriori*, estrategias y planes de conservación efectivos [20].

No fue hasta el 2002 cuando comenzó el segundo proyecto LIFE, con el objetivo de estabilizar las dos únicas poblaciones existentes de linces ibéricos, asegurando su viabilidad a largo plazo [20]. Este proyecto finalizó en 2006 y le siguió otro proyecto LIFE de manera consecutiva. En este proyecto se mejoró el estado del conejo salvaje y del hábitat donde habitan linces ibéricos y conejos, se reintrodujeron linces ibéricos en zonas de distribución histórica y se hicieron refuerzos genéticos en la población de Doñana mediante el programa de cría en cautividad [20]. Dicho proyecto finalizó en 2011.

En 2011 comenzó el cuarto y más reciente proyecto LIFE, llamado LIFE+Iberlince, con el objetivo de recuperar el área de distribución histórica del lince ibérico [1], [21]. Este proyecto ha finalizado en 2018 y se está preparando un quinto proyecto LIFE, cuyos objetivos pasarán por consolidar los núcleos de reintroducción iniciados para conseguir poblaciones autosuficientes, además de interconectar todas las poblaciones entre sí para asegurar la viabilidad genética de la especie a largo plazo [1].

---

5 LIFE (*L'Instrument Financier pour l'Environnement*) es un instrumento de la Unión Europea para financiar proyectos de conservación medioambiental.

## Capítulo 3. Métodos de monitoreo

En este capítulo se detallan los métodos de monitoreo de poblaciones de lince ibéricos considerados y se selecciona la solución tecnológica. El capítulo se estructura como sigue: en la Sección 3.1 se ilustran las alternativas, mientras que en la Sección 3.2 se selecciona la más adecuada.

### 3.1. Alternativas consideradas

Actualmente existen multitud de técnicas para monitorear poblaciones de animales salvajes y obtener datos poblacionales, tales como abundancia relativa<sup>6</sup>, abundancia absoluta<sup>7</sup> y extensión de territorio<sup>8</sup>. Las más utilizadas para monitorear carnívoros de tamaño medio son:

- Análisis por ADN de huellas y rastros.
- Collares de rastreo.
- Fototrampeo.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las características de cada técnica, mientras que en las siguientes subsecciones se detalla cada alternativa.

	Análisis de ADN de huellas y rastros	Collares de rastreo	Fototrampeo
<b>Fiabilidad</b>	Baja	Alta	Alta
<b>Intrusividad</b>	Nula	Alta	Nula
<b>Viabilidad para grandes territorios</b>	Nula	Alta	Alta
<b>Coste económico</b>	Alto	Alto	Bajo

**Tabla 1.** Comparativa entre las tres técnicas consideradas para monitorear poblaciones de lince ibéricos.

<sup>6</sup> La abundancia relativa de una población es expresada como el número de indicios encontrados (huellas, letrinas, etc.) por kilómetro [22]. Se correlaciona con la abundancia absoluta.

<sup>7</sup> La abundancia absoluta indica el número total de ejemplares que viven en un territorio determinado [22].

<sup>8</sup> La extensión de territorio indica el tamaño medio del área que tiende a ocupar un ejemplar de la especie en estudio.

### **3.1.1. Análisis de ADN de huellas y rastros**

El recuento de huellas, rastros e indicios de un animal es el método clásico utilizado para obtener datos de su población. Con el tiempo, esta técnica ha incorporado el análisis por ADN de los rastros para una identificación individualizada. Consiste en rastrear territorios y recontar todo indicio del animal de estudio, realizando un análisis de ADN. Se basa en determinar la densidad relativa, la cual tiene cierta correlación con la población total de individuos [22]. Hasta la década de los 90, ha sido el método utilizado para realizar censos de población de lince ibérico [2], [23].

Sin embargo, es una técnica que tiene un alto coste económico asociado [24], puesto que requiere de muchos trabajadores a pie de campo. Si el territorio que se quiere censar es grande, la cantidad de trabajadores requeridos para buscar rastros, huellas e indicios es enorme, lo que la convierte en inviable y restringida a censar poblaciones de pequeños territorios.

Además, ofrece resultados poco precisos [2], por lo que su uso no es recomendado para censar poblaciones de especies en peligro de extinción, ya que cualquier posible sobreestimación realizada podría conllevar que las estrategias de conservación no se aplicaran en el debido momento, con la consiguiente extinción de la especie [6].

### **3.1.2. Collares de rastreo**

Esta técnica se basa en instalar collares de rastreo en ejemplares previamente capturados de la especie en estudio para, tras una posterior liberación, obtener datos por GPS de sus ubicaciones.

Es un método intrusivo, que al requerir una previa captura del animal, pone en riesgo tanto su salud como la de la persona que lo captura [25].

Los animales con collares de rastreo proporcionan datos fiables de la extensión de territorio que regentan [6], y con este se pueden obtener censos de población mediante extrapolación. No obstante, es un método lento, y se puede llegar a tardar hasta un año para obtener datos de la extensión de territorio y, con ellos, censar la población [25].

Es una técnica cara, no solo por el coste de los collares de seguimiento, sino también por el equipo necesario para realizar la captura del animal [25].

En la Figura 10 se observa un ejemplar de lince ibérico con collar de radiofrecuencia.



**Figura 10.** Lince ibérico con collar de radiofrecuencia [26].

### 3.1.3. Fototrampeo

El fototrampeo consiste en censar poblaciones mediante una red de cámaras trampa, las cuales se instalan a pie de campo en territorios conocidos donde viven poblaciones del animal en estudio, tomando fotografías de ellos. A partir de las fotografías, se construyen modelos estadísticos diseñados para estimar parámetros e investigar dinámicas de la población [27]. En la Figura 11 se muestra una fotografía de lince ibérico tomada por una cámara trampa.

Es la técnica más habitual a día de hoy, especialmente en el campo de mamíferos elusivos, como el lince ibérico [2], [5], [6], [8], [22], [24]. Al identificar a los animales mediante fotografías, tiene mucho potencial para identificar individualmente a cada ejemplar, siempre y cuando estos tengan algún tipo de marcaje único, como es el caso del lince ibérico con su moteado [2]. De hecho, es especialmente recomendado para



lince ibérico, ya que estos son considerados como los lince con el pelaje más marcado [12].

A pesar de que es la técnica más adecuada para censar poblaciones de animales salvajes, su uso para determinar otros parámetros más complejos como la extensión de territorio es puesto en duda por algunos autores [6], [8], [12], [25], aunque existen esperanzas dentro de la comunidad científica en mejorar este aspecto, aplicando un mejor tratamiento de datos [6].



**Figura 11.** Fotografía de lince ibérico tomada por una cámara trampa [15].

Es un método rápido, capaz de censar una población en menos de dos meses [25]. Siempre y cuando la cámara no utilice flash o utilice uno infrarrojo, no perturba a los animales, por lo que es no invasivo. De hecho, debido al aumento de interés durante las últimas décadas en el bienestar animal, conjuntamente con los avances de la electrónica, ha sido la técnica que más ha evolucionado [27].

### **3.2. Selección de alternativa**

El análisis de ADN de huellas y rastros, si bien ha sido una solución utilizada a lo largo de los años, no proporciona datos fiables. Además, tiene un alto coste económico y está restringido a censar poblaciones de territorios pequeños. Como no cumple las especificaciones básicas plasmadas en la Sección 1.3, es un método que se descarta.

Los collares de rastreo son un método invasivo, que requiere de la captura de un animal y la posterior instalación del sensor en él, por lo que viola también las especificaciones básicas y, debido a ello, se descarta.

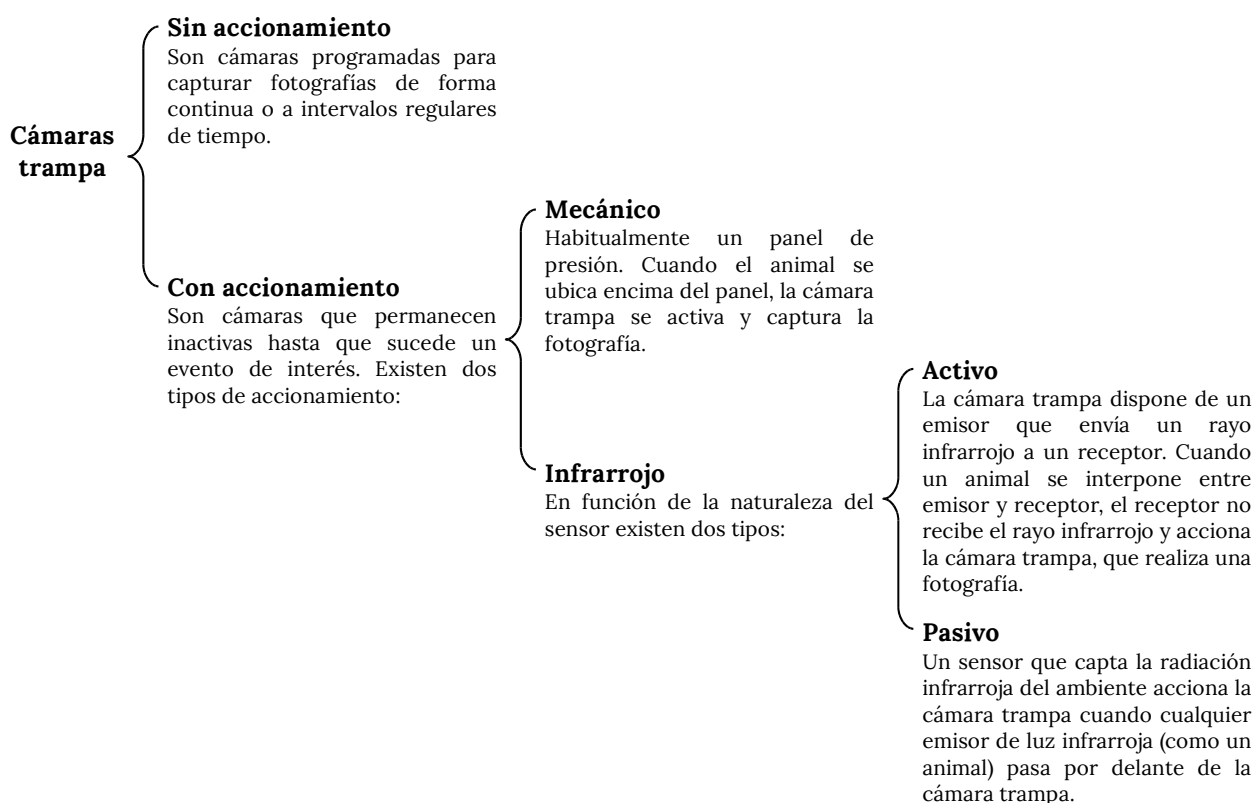
Por consiguiente, la mejor solución tecnológica para monitorear poblaciones de lince ibérico consiste en utilizar el fototrampeo que, además de ser la solución más utilizada a día de hoy, es no invasiva, de bajo coste, permite monitorear grandes territorios y, aunque su viabilidad para determinar parámetros poblacionales avanzados está puesta en duda, presenta a su vez grandes esperanzas de solventarlo con un mejor tratamiento de datos.

## Capítulo 4. Fototrampeo

En el presente capítulo se realiza un estado del arte del fototrampeo. Se estructura como sigue: en la Sección 4.1 se detallan las diferentes cámaras trampa; el posible uso de señuelos se analiza en la Sección 4.2; en la Sección 4.3 se analizan las técnicas para formar redes sensoriales con cámaras trampa; y un estudio de anteriores proyectos que utilizaron cámaras trampa se realiza en la Sección 4.4.

### 4.1. Tipología de cámaras trampa

Las cámaras trampa se pueden clasificar en los siguientes tipos, en función del mecanismo de puesta en funcionamiento de las mismas [27], Figura 12.



**Figura 12.** Tipos de cámaras trampa según la tecnología de accionamiento.



### **4.1.1. Sin accionamiento**

Las cámaras trampa sin accionamiento funcionan de manera continuada o a intervalos regulares. Debido a esto, consumen mucha energía, comparado con las otras alternativas.

Habitualmente se utilizan en el estudio de aves, y raramente en el estudio de mamíferos [27]. De hecho, en la literatura no hay prácticamente información disponible sobre el uso de cámaras trampa sin accionamiento para el estudio de felinos.

### **4.1.2. Con accionamiento mecánico**

El accionamiento mecánico consiste en un panel de presión conectado a la cámara mediante cableado. El panel se sitúa alejado de esta, en una posición donde pueda posarse el animal de estudio y quede bien enfocado con respecto a la cámara. Cuando el animal se sitúa encima del panel, este lanza una interrupción al microcontrolador que gobierna la cámara, que la activa y lanza una fotografía.

Esta tecnología de accionamiento tiene dos principales inconvenientes:

- El animal debe estar situado en un punto concreto (encima del panel de presión) para poder fotografiarlo. Por ello, esta tecnología tiende a requerir el uso de señuelos para lograr que el animal se ubique en el lugar deseado.
- La cámara trampa consta de dos componentes separados y unidos mediante cableado: la cámara y el panel de presión. Esto tiende a generar más problemas. Primero, se requiere que dos elementos y no solamente uno estén bien posicionados, por lo que los problemas de alineamiento se multiplican. Segundo, es conocido en el campo de la conservación de especies de numerosos fallos debido a que los animales muerden el cableado [27].

Las cámaras trampa con accionamiento mecánico eran utilizadas en los inicios del fototrampeo [24], pero los avances de los últimos años en accionamientos infrarrojos las han dejado prácticamente en desuso [27]. De hecho, los accionamientos infrarrojos proporcionan mejores resultados que los accionamientos mecánicos [12] y son los más habituales a día de hoy [24].

### 4.1.3. Con accionamiento infrarrojo activo

Pese a que tanto accionamientos infrarrojos activos como pasivos utilizan luz infrarroja para accionar la cámara, su principio de funcionamiento es diferente, lo que confiere a ambas opciones características distintas.

Los accionamientos infrarrojos activos tienden a generar más falsas activaciones que los pasivos [22], [24]. Esto es debido a que la activación se produce cuando un animal interrumpe el rayo de luz infrarroja entre emisor y receptor; sin embargo, también una solitaria hoja que cae de un árbol en plena estación otoñal puede hacerlo, o un frío copo de nieve de un largo invierno. No hay sensibilidad en la interrupción del rayo de luz infrarroja, cualquier animal u objeto, por pequeño que sea, puede hacerlo.

Además, reproducen los inconvenientes de los accionamientos mecánicos, puesto que el animal debe interrumpir el rayo de luz infrarroja entre emisor y receptor para poder fotografiarlo, lo que hace que tenga que estar ubicado en unos puntos concretos; y la cámara trampa está compuesta por dos componentes conectados mediante cableado: por un lado cámara con emisor de luz infrarroja, y por otro lado receptor de luz infrarroja, lo que tiende a generar más fácilmente problemas de alineamiento debido a un diseño no compacto.

### 4.1.4. Con accionamiento infrarrojo pasivo

El accionamiento infrarrojo pasivo utiliza un sensor infrarrojo pasivo, también llamado PIR (*Passive Infrared Sensor*), para accionar la cámara trampa. Este sensor capta la radiación infrarroja del ambiente y envía una interrupción al microcontrolador cuando existe una variación brusca de esta, es decir, cuando un animal o cualquier objeto que emite luz infrarroja pasa por delante del sensor.

No funciona bien en zonas con temperaturas muy altas [27], y tampoco en zonas con grandes altitudes [22], dado que en estas existe un mayor ruido de radiación infrarroja de fondo. En estas zonas existe el riesgo de que el movimiento de un animal por delante de la cámara no genere el cambio de radiación térmica suficiente como para que lo detecte el PIR, causando así un no accionamiento de la cámara trampa.

Aunque esto no es problema para el lince ibérico, ya que en su hábitat, el bosque mediterráneo, se alcanzan temperaturas máximas de 40°C, tal y como se indica en la Sección 2.2. Igualmente, las altitudes de la península ibérica son bajas, especialmente en las zonas donde viven lince ibéricos.

Asimismo, permite un diseño compacto de la cámara trampa, en el cual todos los componentes están dentro de una misma carcasa protectora, sin cableados ni ningún elemento exterior.

Comparado con el activo, permite una mayor zona de detección [27], evitando así que el animal de estudio deba estar en un punto concreto del espacio para poder ser fotografiado, ofreciendo más flexibilidad y mejor ratio de detección.

Aunque también es susceptible a sufrir falsas activaciones debido a hojas o frutos que caen de árboles, por norma general es necesario que el animal u objeto emisor de luz infrarroja sea de dimensiones, cuanto menos, considerables, reduciendo así el número de falsas activaciones debido a la nieve, hojas, ramas, frutos, etc.

## **4.2. Uso de señuelos**

Debido a la necesidad inherente de las cámaras trampa de que el animal de estudio esté en una ubicación determinada para poder fotografiarlo, es frecuente el uso de señuelos para atraerlos, con el fin de mejorar el ratio de detección y la cantidad de fotografías que la cámara es capaz de realizar en una detección [12].

Se colocan cerca de las cámaras trampa, en aquella ubicación que permite mejores fotografías. Pueden ser de diversas índoles, dividiéndose en dos grandes grupos: señuelos visuales y señuelos olfativos.

Los señuelos visuales consisten en presas del animal de estudio (conejo para el lince ibérico) dispuestas en jaulas con protección y alimento [5]. Así, estas presas atraen a los animales de estudio a las ubicaciones deseadas. El principal problema de este tipo de señuelos radica en la necesidad de visita periódica a las presas capturadas para reponer alimento, lo que en grandes redes de fototrampeo o en territorios salvajes de difícil acceso es inviable, además de la crueldad que supone tener a un animal enjaulado con la única finalidad de atraer a otro.

Los señuelos olfativos son estaciones de olor, habitualmente de orina de hembra de la especie de estudio. Ofrecen mejores resultados que los señuelos visuales, pudiendo atraer a ejemplares de una gran variedad de especies [8]. Desde un punto de vista de la protección animal, el uso de señuelos de olor es menos intrusivo que el uso de señuelos visuales. Sin embargo, también requieren de visita periódica para reponer el olor [2].

Pese a las ventajas que proporciona utilizar señuelos, diversos autores desaconsejan su uso [6], [8], [22]. Esto es debido a que el animal, con el tiempo, se acostumbra al estímulo del señuelo y termina por no responder ante él. Especialmente sucede este fenómeno con felinos, ya que estos tienen una alta curva de aprendizaje.

### 4.3. Redes de fototrampeo

La creación de redes de fototrampeo con cámaras trampa para monitorear y censar poblaciones de animales salvajes es más un arte que una ciencia [22]. La metodología a seguir para la formación de redes está basada en la experiencia previa; por lo cual, a continuación se recogen una serie de consejos o instrucciones de investigadores y autores con experiencia en la formación de redes de fototrampeo.

La disposición y ubicación de las cámaras trampa se realiza de forma manual en sitios estratégicos [12], como en caminos conocidos o en letrinas de la especie en estudio. Por ello, es necesario un estudio previo del territorio a censar para elegir las mejores ubicaciones posibles [22].

Si la cámara trampa se sitúa en un camino conocido, es recomendable situarla a tres metros de este, aproximadamente [22]. Con esto se asegura que el animal esté en buena ubicación para ser fotografiado cuando pasa por delante de la cámara trampa.

En general, el territorio a monitorear se divide en áreas de tamaño igual a la menor extensión de territorio posible de un ejemplar del animal a monitorear (aproximadamente 300 ha para el lince ibérico, ver Sección 2.2) y se colocan dos o tres cámaras por área [6], [22], asegurando así que ningún ejemplar se queda sin posibilidades de ser fotografiado. Por tanto, para formar una red de fototrampeo para monitorear al lince ibérico se debe disponer de una cámara trampa cada 100 ha [2], [5], [12].

El patrón de moteado en el pelaje es fácilmente identificable en los lados y en las patas del lince ibérico, pero como este patrón es diferente en ambos lados del animal, muchos autores concuerdan en utilizar, para una misma ubicación, como una letrina o un camino conocido, dos cámaras trampa enfrente una de la otra, para poder fotografiar ambos lados del animal [6], [8], [22], [25], [28].

También es recomendable orientar cada cámara trampa al norte o al sur, más que al este o al oeste, siempre y cuando se utilicen cámaras trampa con accionamiento infrarrojo, ya que el Sol puede provocar falsos positivos [22].

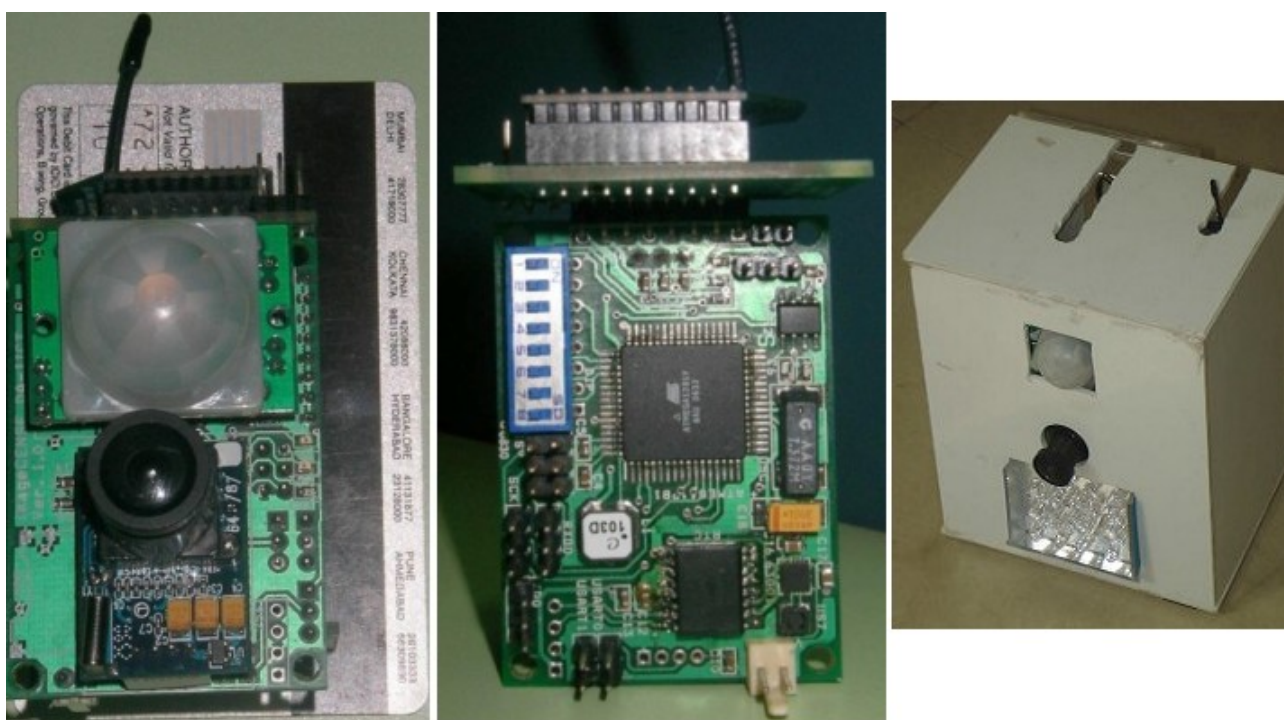
## 4.4. Proyectos previos

### 4.4.1. TigerCENSE

TigerCENSE es un proyecto realizado por Ranjan *et al.* [24] cuyo objetivo es monitorear y establecer patrones de movimiento de tigres mediante una red de sensores de imagen inalámbricos (WiSN, por sus siglas en inglés *Wireless Image Sensor Network*).

Los tigres a monitorear viven en territorios salvajes y de difícil acceso, por lo que la solución implementada en este proyecto consiste de sensores compactos, no intrusivos, eficientes energéticamente y fiables.

Los nodos de la red son cámaras trampa con accionamiento infrarrojo pasivo, las cuales obtienen fotografías mediante un sensor de imagen CMOS. Este tipo de tecnología de sensor de imagen, comparada con la opción clásica CCD, ofrece un consumo reducido, poco coste y menor tamaño físico. No utilizan modelos comerciales de cámaras trampa, sino que diseñan un modelo específico orientado a las necesidades de los tigres y que pallee las desventajas de los modelos comerciales. En la Figura 14 se observa el diseño realizado.



**Figura 13.** Cámara trampa diseñada en el proyecto TigerCENSE [24].

Para reducir el consumo de la cámara trampa, todos los componentes, excepto el sensor PIR, se encuentran, de manera por defecto, en reposo e inactivos; cuando el sensor PIR detecta una intrusión, envía una interrupción al microcontrolador que mediante interruptores activa a todos los componentes. El uso de interruptores disminuye el consumo en reposo de la mayoría de componentes, el cual no es lo suficientemente bajo. El sensor infrarrojo necesita una iniciación para capturar la radiación infrarroja del ambiente. Este *set-up* inicial, que se realiza únicamente en la instalación de la cámara trampa, requiere de entre 10 y 60 segundos.

El retardo entre detección de tigre (activación del sensor PIR) y captura de la fotografía es de 1.8 segundos.

Cada fotografía incorpora la fecha y hora de la captura; para ello, cada cámara trampa dispone de un reloj de tiempo real (RTC, de las siglas en inglés *Real Time Clock*). El RTC requiere de una inicial sincronización pero, tras esta, es capaz de determinar la fecha y hora durante años. También incorpora la identificación del nodo para poder determinar en qué ubicación se produce la detección.

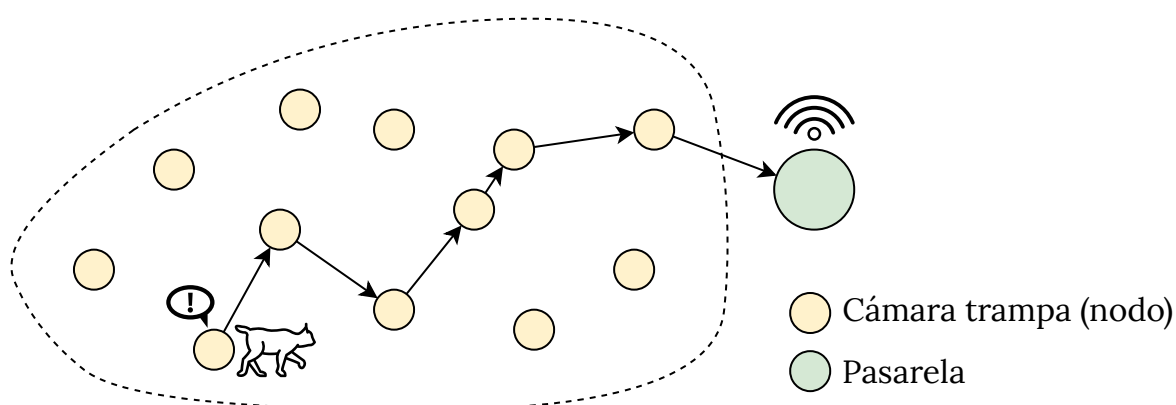
Como los tigres son animales con alta actividad nocturna, las cámaras trampa utilizan flash infrarrojo que permite fotografiarlos de noche sin perturbarlos. Este flash se consigue mediante 12 LED que emiten luz con una longitud de onda de 850 nm. Los LED proporcionan un flash con una potencia radiante de 2300 mW/sr. También tienen un fotoresistor con el fin de activar el flash solo cuando sea necesario. Si la luminosidad medida por el fotoresistor es baja, el microcontrolador activa el flash infrarrojo mediante MOSFET. El fotoresistor está conectado a los pines ADC del microcontrolador con un filtro LC para disminuir ruido.

Los LED utilizados tienen un alto brillo y eficiencia, lo que permite utilizar menos LED para conseguir los mismos resultados que una cámara trampa comercial. Están dispuestos en paralelo, ya que en esta configuración, a diferencia de en serie, se pueden conseguir altas corrientes en vez de altos voltajes, y la fallada de uno no supone la fallada de todos. Los LED se utilizan a modo de pulso, son usados durante 30 ms con una corriente de 3 A para generar el flash. Este tiempo que están encendidos está cuidadosamente seleccionado, puesto que un valor más bajo hace que no se puedan detectar bien las manchas del pelaje y con un valor más alto se puede sufrir desenfoque por movimiento (también llamado *motion blur* en inglés). Como la batería no es capaz de suministrar los amperios requeridos para el

funcionamiento de los LED, utilizan dos supercondensadores en serie, que funcionan a modo de *buffer* de carga eléctrica.

Los MOSFET utilizados como interruptores para activar los LED tienen una baja resistencia asociada con el fin de reducir pérdidas, puesto que la corriente que circula por ellos es muy elevada (3 A).

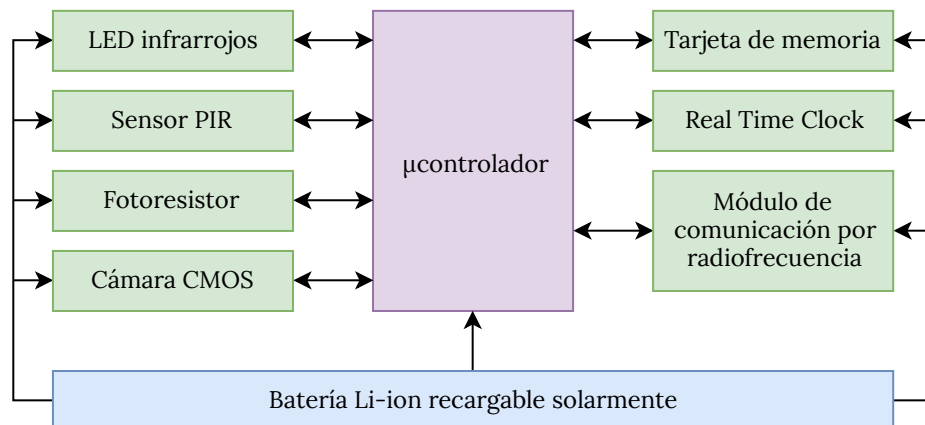
Como la red está instalada en un valle aislado y alejado de la civilización humana, no existe conexión a internet y la transmisión de información se realiza mediante *multihop*. Cada nodo dispone de un módulo de comunicación de radiofrecuencia de corto alcance (hasta 1.5 km) y envía la información al nodo vecino. Los datos pasan de nodo a nodo hasta que finalmente llegan a una pasarela con conexión a internet ubicada en lo alto de una colina que la envía a la red, tal y como se observa en la Figura 14. En caso de malas condiciones meteorológicas, la transmisión de radiofrecuencia podría no poder realizarse, por lo que las cámaras trampa también incorporan una tarjeta de memoria de 2 GB, para almacenar los datos el tiempo necesario hasta su envío.



**Figura 14.** Arquitectura de comunicación multihop.

Cada cámara trampa dispone de un convertidor DC-DC buck boost que proporciona el voltaje requerido a los distintos componentes con una alta eficiencia. También dispone de una batería Li-ion con una autonomía de 1 mes recargable mediante placas solares. Estos dos componentes, unidos a los MOSFET utilizados a modo de interruptores, proporcionan una alta eficiencia energética a la cámara trampa.

En la Figura 15 se observa el diagrama esquemático de la solución tecnológica diseñada en el proyecto TigerCENSE, con los principales componentes.



**Figura 15.** Diagrama de la cámara trampa diseñada en TigerCENSE [24].

Los nodos de la red son dispuestos de forma manual en cada bifurcación de rutas conocidas, a una distancia aproximada de 3 metros del camino.

Las cámaras trampa permiten modificar parámetros de funcionamiento de manera remota, evitando así la necesidad de que un técnico se desplace hasta la cámara trampa para modificarlos. También envían periódicamente mensajes de su estado de salud, permitiendo conocer en qué instante ha dejado de funcionar una cámara trampa.

La lente utilizada no incorpora filtro infrarrojo y proporciona un campo de visión (FOV, de las siglas en inglés *Field of View*) de 60°.

La placa PCB está fabricada con cobre para reducir al mínimo el ruido y disminuir el calor generado por los componentes de la cámara trampa.

Asimismo, en base a los resultados conseguidos, futuras mejoras han sido marcadas por los autores del proyecto TigerCENSE:

1. Mínimo retardo alcanzable entre detección del sensor PIR y captura de la fotografía de 250 ms.
2. Tiempo mínimo alcanzable entre dos capturas consecutivas de 1 s con el uso de una tarjeta de memoria más rápida.
3. Reducción del número de LED a utilizar para generar el flash de 12 a 5 o 6 mediante una mejora del sistema de *buffer* de carga eléctrica.
4. Agregación de sensores de clima a la cámara trampa.



5. Procesado de datos digital anterior al envío con la finalidad de reducir consumo y tiempo de envío.

En la Tabla 2 se recoge un resumen de las características de la cámara trampa diseñada en el proyecto TigerCENSE.

<b>Tipo de accionamiento</b>	Infrarrojo pasivo
<b>Sensor de imagen</b>	CMOS
<b>Retardo de captura de fotografía</b>	1.8 segundos
<b>Tipo de flash</b>	Infrarrojo (850 nm)
<b>N.º de LED utilizados para el flash</b>	12
<b>Potencia radiante del flash</b>	2300 mW/sr
<b>Modo de funcionamiento de los LED</b>	Modo pulso (30 ms)
<b>Disposición de los LED</b>	Paralelo
<b>Corriente consumida por los LED</b>	3 A
<b>Sistema de buffer de carga eléctrica</b>	2 supercondensadores en serie
<b>Tipo de interruptores</b>	MOSFET
<b>Modo de transmisión de datos</b>	Multihop
<b>Tecnología de transmisión de datos</b>	Radiofrecuencia
<b>Alcance de transmisión de un nodo</b>	1.5 km
<b>Tarjeta de memoria</b>	SD 2 GB
<b>Convertidor DC-DC</b>	Buck boost
<b>Batería</b>	Li-ion
<b>Autonomía de la batería</b>	1 mes (recargable mediante placas solares)
<b>FOV de la lente</b>	60°
<b>Material PCB</b>	Cobre
<b>Metodología de distribución de nodos</b>	Manual (en bifurcaciones)
<b>Distancia entre camino y nodo</b>	3 metros
<b>Otros componentes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotorresistor (con filtro LC)</li> <li>• RTC</li> </ul>
<b>Otras características de la cámara trampa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configuración remota</li> <li>• Mensaje de estado de salud periódico</li> <li>• Retardo de captura de fotografía de 250 ms</li> <li>• Tiempo entre dos capturas consecutivas de 1 s</li> <li>• 5 LED para generar el flash</li> <li>• Agregación de sensores de clima</li> <li>• Procesado de datos digital antes del envío</li> </ul>
<b>Futuras mejoras</b>	

**Tabla 2.** Características de la cámara trampa diseñada en el proyecto TigerCENSE.

### 4.4.2. Lince euroasiático

Otro proyecto relacionado es el realizado por Weingarth *et al.* [28] en la estimación de abundancia y densidad de lince euroasiáticos (*Lynx lynx*) en un parque nacional alemán mediante una red de fototrampeo.

En este proyecto, sin embargo, las cámaras trampa utilizadas son comerciales de la marca Cuddeback Capture.

La red consiste en 24 estaciones de trampa, cada una de las cuales consta de dos cámaras trampa situadas una enfrente de la otra para fotografiar ambos lados del animal, ya que como en el caso del lince ibérico, el patrón de moteado del lince euroasiático difiere en sus dos lados.

Las cámaras trampa son accionadas mediante un sensor infrarrojo pasivo con un retardo entre detección de animal y captura de fotografía de 300 ms. El tiempo entre dos fotos consecutivas es de 30 segundos. Tienen baterías no recargables, por lo que técnicos deben visitar cada estación de trampeo una vez a la semana para cambiar baterías.

Las cámaras se ubican a una altura del suelo de 70 cm y las dos cámaras de una misma estación de trampeo se sitúan separadas entre sí a una distancia de entre 4.5 a 10 metros, a la par que rotadas unos grados para que no se afecten mutuamente con el flash.

A diferencia del proyecto TigerCENSE, en este proyecto se utiliza flash blanco en lugar de flash infrarrojo, lo que perturba a los animales que son fotografiados.

Para proteger a las cámaras del daño físico, unas protecciones de madera, externas a las cámaras trampa, son dispuestas.

### 4.4.3. Jaguar I

Dos proyectos relacionados con la conservación del jaguar (*Panthera onca*) son considerados. El primero, realizado por Soisalo y Cavalcanti [6], trata sobre la estimación de población y densidad de jaguares en Brasil mediante una red de fototrampeo conjuntamente con collares de radiotelemetría.

La red de fototrampeo consiste en 8 estaciones de trampeo, cada una de las cuales consta de dos cámaras trampa. Utiliza dos modelos de cámara trampa, 15 de las

16 son del fabricante Trailmaster, modelo TM1550, con accionamiento infrarrojo activo y la restante del fabricante Camtrakker, con accionamiento infrarrojo pasivo.

Las cámaras se ubican a una altura del suelo de 70 cm y las dos cámaras de una misma estación de trampeo se sitúan separadas entre sí a una distancia de 7 u 8 metros. Cada estación es chequeada diariamente o cada dos días.

El tiempo entre dos fotografías consecutivas es de 3 minutos.

Para realizar la distribución de nodos de la red de fototrampeo, primeramente instala collares de radiotelemetría a ejemplares previamente capturados. A partir de los datos obtenidos por estos, estima la extensión de territorio de los jaguares y divide el territorio a monitorear en áreas de extensión igual a esta. Ubica dos o tres cámaras trampa en cada división.

#### **4.4.4. Jaguar II**

El segundo proyecto concerniente a la conservación de jaguares considerado es el realizado por Noss *et al.* [25], cuyo objetivo es monitorear jaguares en un parque nacional de Bolivia para estimar densidades.

En este proyecto se instalan varias redes de fototrampeo pequeñas. Cada una de las cuales consta de estaciones de trampeo, donde dos cámaras trampa son ubicadas a ambos lados de un posible camino para fotografiar los dos lados del animal en caso de detección.

Las cámaras trampa utilizadas son de los fabricantes Camtrakker y Trailmaster, con accionamiento infrarrojo activo y pasivo, respectivamente. El intervalo entre fotografías consecutivas es de 3 minutos.

En la distribución de nodos de la red de fototrampeo, con el fin de que no exista ningún ejemplar del territorio a monitorear que no tenga probabilidades de ser fotografiado, las estaciones de trampeo se ubican a una distancia entre ellas igual a la mitad de la distancia máxima que un ejemplar es capaz de recorrer en su extensión de territorio.

#### **4.4.5. Lince ibérico**

Pese a la existencia de proyectos de conservación del lince ibérico, Sección 2.4, durante la última década no existe literatura sobre las cámaras trampa utilizadas en el

monitoreo de esta especie, aun cuando a día de hoy se tienen identificados el 100% de ejemplares de lince ibérico en la península ibérica gracias al fototrampeo [3].

Debido a ello, la mayoría de proyectos existentes en la literatura que se centran o tratan sobre la tecnología sensorial utilizada en las redes de fototrampeo data de hace entre 10 y 20 años.

Sin embargo, ciertos parámetros y características de las redes de fototrampeo utilizadas en estos proyectos siguen siendo relevantes a día de hoy.

En el trabajo realizado por Garrote *et al.* [2], cuyo objetivo es censar la población de lince ibérico en Doñana mediante una red de fototrampeo, se utiliza una red formada por 543 cámaras trampa.

Estas son accionadas por paneles de presión y utilizan orina de lince ibérico como señuelo, para mejorar el ratio de detección. Debido al señuelo, cada estación de trampeo es visitada cada 3 días.

Guil *et al.* [5], [8], en su estudio sobre la eficiencia de diferentes técnicas para monitorear lince ibérico, ya concluye que los flashes infrarrojos proporcionan mejores resultados que los normales por no perturbar a los animales.

En este proyecto se ubican las cámaras trampa en territorios de crianza, reproducción y letrinas para mejorar el ratio de detección. La red de fototrampeo está formada por 411 cámaras trampa, aproximadamente una por cada 100 ha. Son del fabricante Stealth Cam y tienen accionamiento infrarrojo pasivo. Utiliza señuelos, aunque también advierte del riesgo de que los lince ibérico se acostumbren a ellos y no les hagan caso.

Advierte también del mal funcionamiento que suelen tener las cámaras trampa comerciales con temperaturas extremas (mayores de 35 °C y menores de -5 °C).

El proyecto realizado por Gil-Sánchez *et al.* [12] trata sobre el uso de collares de radiofrecuencia que conjuntamente con una red de fototrampeo permiten obtener extensiones de territorio del lince ibérico. La red que utiliza consta de una cámara trampa por cada 100 ha, con una distancia media entre cámaras trampa de 0.87 km. Las cámaras son ubicadas en zonas donde se conoce o intuye que viven lince ibérico.

Tanto señuelos visuales como olfativos son utilizados para mejorar el ratio de detección y el número de fotografías obtenidas en una detección. Por ello, cada cámara trampa requiere de una visita por parte de un técnico cada dos semanas.

Las cámaras trampa utilizadas tienen accionamiento infrarrojo pasivo, que proporciona mejores resultados que el accionamiento mecánico, tal y como concluye el estudio tras utilizar ambos tipos de accionamientos.

## Capítulo 5. Diseño de la cámara trampa

En este capítulo se detalla la solución tecnológica escogida. Se estructura como sigue: en la Sección 5.1 se selecciona la tipología de la cámara trampa a diseñar; las características de la cámara trampa quedan ilustradas en la Sección 5.2; en la Sección 5.3 se definen los componentes de la cámara trampa, con la selección de las mejores alternativas; en la Sección 5.4 se ilustra la empresa realizadora de la PCB; y en la Sección 5.5 se detalla el software a programar en el  $\mu$ C para obtener la función deseada de la cámara trampa;

### 5.1. Tipología de la cámara trampa

Así pues, fundamentado en lo explicado en la Sección 4.1, la cámara trampa es accionada mediante accionamiento infrarrojo pasivo, ya que las ventajas inherentes a esta tipología mejoren enormemente a las de las otras tipologías.

Primeramente, las cámaras trampa sin accionamiento solo están recomendadas para estudios que requieran de fotografías a intervalos de tiempo regulares o de forma continua. Por esto, son muy utilizadas para el estudio de aves, ya que estas cámaras trampa se colocan en el mismo nido. Sin embargo, para el estudio de felinos como el lince ibérico, es una tipología completamente inadecuada, ya que los linces son esquivos y viven en amplias extensiones de territorio, causando así un derroche de energía considerable al capturar fotografías de forma regular o continua y no en los instantes de posible presencia del animal.

Las cámaras trampa con accionamiento mecánico, si bien históricamente han sido ampliamente utilizadas en el estudio de felinos, a día de hoy están mayormente en desuso debido a la necesidad de que el animal de estudio se pose una posición determinada (normalmente encima de un panel de presión), reduciendo así el ratio de capturas.

Si bien hasta ahora el descarte de tipologías ha sido trivial, la decisión crítica viene determinada por la selección entre accionamiento infrarrojo activo y accionamiento infrarrojo pasivo.

Ambas tipologías ofrecen diferentes ventajas e inconvenientes, por lo que determinar cuál es mejor no es tarea sencilla. El accionamiento infrarrojo activo tiende a generar más falsas activaciones, debido a que cualquier objeto, por pequeño

que sea, que pueda interrumpir el rayo de luz entre emisor y receptor activa la cámara trampa. Aunque con accionamiento infrarrojo pasivo también existe el riesgo de sufrir falsas activaciones, por la naturaleza del sensor pasivo, el animal u objeto que causa activación debe tener un tamaño considerable. Una hoja de un árbol, debido a su tamaño, es menos probable que cause una falsa activación con accionamiento infrarrojo pasivo que con accionamiento infrarrojo activo. No obstante, un conejo, al tener un tamaño más grande, puede perfectamente causar falsa activación en ambas tipologías.

Otra característica diferencial es que el accionamiento infrarrojo pasivo permite un diseño de la cámara trampa compacto, monobloque, mientras que el accionamiento infrarrojo activo necesita de dos componentes (emisor y receptor). Un diseño monobloque de la cámara trampa implica mayor sencillez en el diseño y menor probabilidad de fallo al disponer de un solo elemento.

Por estos motivos, la tipología más adecuada y, por ende, la tipología seleccionada para el diseño de la cámara trampa, es la tipología de accionamiento infrarrojo pasivo.

## 5.2. Características de la cámara trampa

El diseño de la cámara trampa está fuertemente influenciado por el proyecto TigerCENSE, Sección 4.4.1, tomando como referencia los componentes de la cámara trampa diseñada en ese proyecto e intentando cumplir, en la medida de lo posible, las futuras mejores expuestas en el propio trabajo de Ranjan *et al.* [24].

Por tanto, la cámara trampa del presente proyecto consta de los siguientes componentes:

- *μcontrolador*. Único componente inteligente de la cámara trampa, contiene el programa que otorga la funcionalidad deseada.
- *Sensor de imagen o cámara*.
- *Lente de la cámara*. Otorga un campo de visión determinado al sensor de imagen.
- *Tarjeta de memoria*. Componente que almacena fotografías hasta que son transmitidas.

- *Sensor infrarrojo pasivo.* Componente encargado de detectar la presencia de lince ibéricos o cualquier otro animal u objeto.
- *Fotoresistor.* Encargado de detectar la luminosidad ambiental para que el  $\mu C$  decida si es necesario lanzar el flash o no.
- *LED infrarrojos.* Componentes que generan un flash en el espectro de luz infrarroja, para no perturbar a los animales.
- *Módulo de transmisión por radiofrecuencia.* Encargado de transmitir las fotografías.
- *Batería.*
- *Panel fotovoltaico.* Componente que ofrece una alta autonomía a la cámara trampa, evitando así la necesidad de visitas periódicas para cambiar las baterías.
- *Convertidor de potencia DC-DC.* Ofrece voltaje constante y al nivel requerido por los componentes.
- *Transistor.* Componente que activa los LED en caso de necesidad de flash.
- *Componentes pasivos.* Tales como resistencias, condensadores e inductores, requeridos por el resto de elementos.
- *Carcasa.* Capaz de ofrecer protección contra la lluvia, posibles daños y una correcta disposición de la cámara trampa para capturar fotografías.

### 5.3. Componentes de la cámara trampa

La selección de componentes para la cámara trampa se realiza mediante el método multicriterio del valor técnico ponderado (VTP), dado que los criterios a considerar son múltiples, cuantificables y no tienen la misma importancia o peso.

Para obtener el VTP de cada alternativa se utiliza la Ecuación (1) para los criterios a minimizar, es decir, aquellos criterios en que un valor más bajo implica mejores prestaciones (el coste económico sería un ejemplo, cuanto menor coste, mejor); y la Ecuación (2) para los criterios a maximizar, es decir, aquellos en los que interesa un valor más alto (la capacidad de una tarjeta de memoria sería un ejemplo, cuanta mayor



capacidad, más fotografías se pueden almacenar, por lo que mejor), donde  $V_{max}$  representa el valor máximo de cualquier alternativa para el criterio de estudio,  $V_{min}$  el valor mínimo,  $V_i$  el valor de la alternativa,  $P_{max}$  la mejor puntuación de cualquier alternativa para un criterio (fijada en 5) y  $P_{min}$  la peor puntuación posible (fijada en 1).

$$p_i = 1 + \frac{V_{max} - V_i}{V_{max} - V_{min}} (P_{max} - P_{min}) \quad (1)$$

$$p_i = 1 + \frac{V_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} (P_{max} - P_{min}) \quad (2)$$

Todas las alternativas de componentes electrónicos están limitadas a modelos con un rango de temperatura ambiental adecuado al del hábitat donde viven los lince ibéricos, tal y como se ha comentado en la Sección 2.2. Por este motivo, no se indica explícitamente, aunque es un valor consultable en los *datasheets*. Todos los componentes se compran en DigiKey.

### 5.3.1. Sensor de imagen (cámara)

#### 5.3.1.1. Criterios

Los criterios a considerar en la evaluación de las alternativas, ordenados de mayor a menor importancia, son:

- *Eficiencia cuántica a 950 nm.* Dado que una de las bases del diseño de la cámara trampa es la no perturbación a los animales, y como el lince ibérico tiene alta actividad nocturna, la cámara trampa tiene flash infrarrojo. Esto implica que la cámara o sensor de imagen debe ser capaz de captar luz infrarroja en la mayor eficiencia posible. Su peso es del 30%.
- *Tamaño del píxel.* Cuanto mayor es el tamaño del píxel del sensor de imagen, mejor capta la luz, por lo que en condiciones de poca visibilidad la cámara es capaz de capturar mejores fotografías. Su peso es del 20%.
- *Consumo.* Un menor consumo implica mayor autonomía, reduciendo la batería necesaria. Su peso es del 20%.
- *Coste económico.* Su peso es del 20%.

- **Megapíxeles.** El número de megapíxeles del sensor de imagen condiciona la resolución de las fotografías, limitando la cantidad de zoom aplicable a la imagen. No es un factor con demasiada importancia, puesto que mientras el patrón de moteado del ejemplar de lince ibérico fotografiado sea reconocible, la calidad de la imagen no conlleva tanta consideración. Su peso es del 10%.

En la Tabla 3 se resumen los diferentes criterios con sus respectivos pesos.

	<b>Eficiencia cuántica a 950 nm</b>	<b>Tamaño del píxel</b>	<b>Consumo</b>	<b>Coste económico</b>	<b>Megapíxeles</b>
<b>Peso</b>	30%	20%	20%	20%	10%

**Tabla 3.** Criterios y sus respectivos pesos en la selección de sensor de imagen.

### 5.3.1.2. Alternativas

La Tabla 4 muestra los valores de cada criterio para cada una de las tres alternativas consideradas.

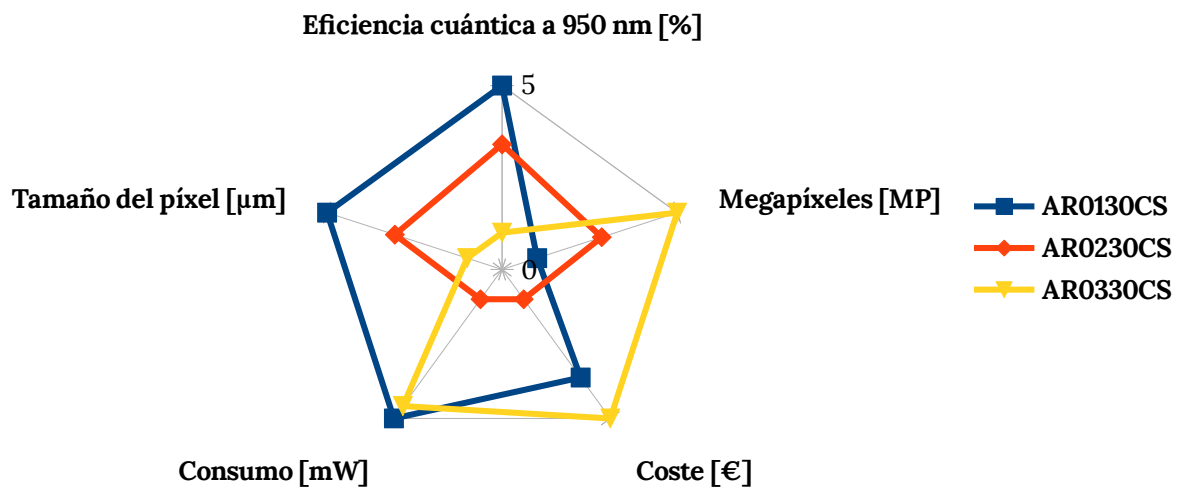
	<b>AR0130CS</b>	<b>AR0230CS</b>	<b>AR0330CS</b>
<b>Eficiencia cuántica a 950 nm [%]</b>	10	8	5
<b>Tamaño del píxel [μm]</b>	3,75	3	2,2
<b>Consumo [mW]</b>	270	386	282
<b>Coste [€]</b>	11,5	16,81	8,73
<b>Megapíxeles [MP]</b>	1,2	2,1	3,15

**Tabla 4.** Valores de los criterios para cada alternativa de sensor de imagen o cámara.

La Tabla 5 muestra las calificaciones -del 1 (peor puntuación) al 5 (mejor puntuación)- de cada alternativa para cada criterio, así como el VTP obtenido; mientras que la Figura 16 ofrece un gráfico de las puntuaciones. Para obtener las calificaciones se ha utilizado la Ecuación 1 para los criterios a minimizar (consumo y coste) y la Ecuación 2 para los criterios a maximizar (eficiencia cuántica a 950 nm, tamaño del píxel y megapíxeles).

	Peso [%]	AR0130CS	AR0230CS	AR0330CS
Eficiencia cuántica a 950 nm [%]	30	5	3,4	1
Tamaño del píxel [ $\mu\text{m}$ ]	20	5	3	1
Consumo [mW]	20	5	1	4,6
Coste [€]	20	3,6	1	5
Megapíxeles [MP]	10	1	2,8	5
Valor Técnico Ponderado (VTP)		4,3	2,3	2,9

**Tabla 5.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de cámara para cada criterio considerado.



**Figura 16.** Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de cámara para cada criterio considerado.

### 5.3.1.3. Solución escogida

Por tanto, se selecciona como cámara o sensor de imagen el modelo AR0130CSSC00SPBA0-DP1, cuyo *datasheet* se encuentra en [29].

### 5.3.2. Sensor infrarrojo pasivo (PIR)

#### 5.3.2.1. Criterios

Los criterios a considerar en la evaluación de las alternativas, ordenados de mayor a menor importancia, son:

- *Consumo*. Un menor consumo implica mayor autonomía, reduciendo la batería necesaria. Al tratarse del único componente que siempre está en funcionamiento, este criterio cobra más importancia. Su peso es del 30%.
- *Rango de detección*. Un mayor rango de detección implica más encuentros con lince ibérico. Su peso es del 20%.
- *Sensibilidad*. Es la mínima diferencia de temperatura entre objeto de interés y ambiente detectable. Su peso es del 20%.
- *Coste económico*. Su peso es del 20%.
- *Campo de visión*. Es el ángulo de detección del sensor. No es un criterio importante, aunque es recomendable que para un correcto funcionamiento de la cámara trampa tienda a coincidir con el campo de visión de la lente y del flash. Su peso es del 10%.

En la Tabla 6 se resumen los diferentes criterios con sus respectivos pesos.

	Consumo	Rango de detección	Sensibilidad	Coste económico	Campo de visión
<b>Peso</b>	30%	20%	20%	20%	10%

**Tabla 6.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de sensor PIR para cada criterio considerado.

#### 5.3.2.2. Alternativas

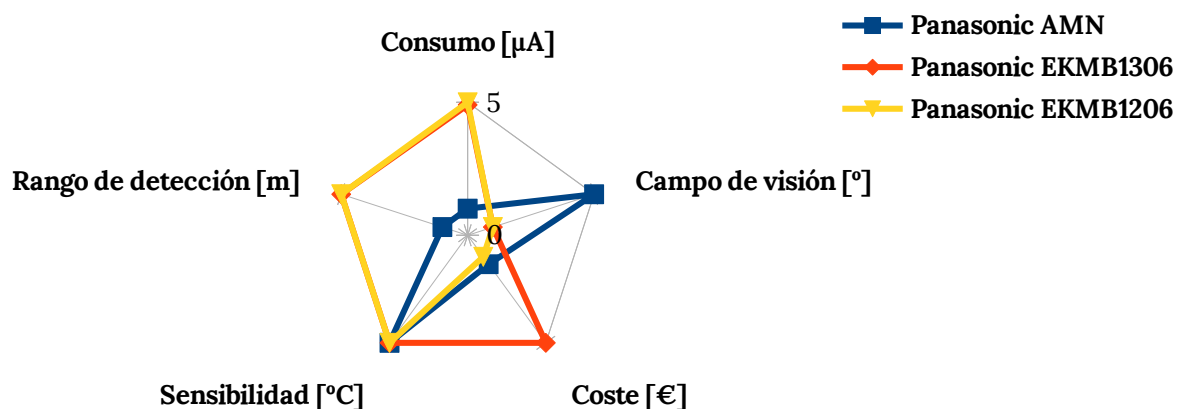
La Tabla 7 muestra los valores de cada criterio para cada una de las tres alternativas consideradas.

	Panasonic AMN	Panasonic EKMB1306	Panasonic EKMB1206
Consumo [ $\mu$ A]	170	6	2
Rango de detección [m]	10	12	12
Sensibilidad [ $^{\circ}$ C]	4	4	4
Coste [€]	19,93	13,61	20,53
Campo de visión [ $^{\circ}$ ]	93	62	62

**Tabla 7.** Valores de los criterios para cada alternativa de sensor PIR.

	Peso [%]	Panasonic AMN	Panasonic EKMB1306	Panasonic EKMB1206
Consumo [ $\mu$ A]	30	1	4,9	5
Rango de detección [m]	20	1	5	5
Sensibilidad [ $^{\circ}$ C]	20	5	5	5
Coste [€]	20	1,3	5	1
Campo de visión [ $^{\circ}$ ]	10	5	1	1
Valor Técnico Ponderado [VTP]		2,2	4,5	3,8

**Tabla 8.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de sensor PIR para cada criterio considerado.



**Figura 17.** Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de sensor PIR para cada criterio considerado.

La Tabla 8 muestra las calificaciones -del 1 (peor puntuación) al 5 (mejor puntuación)- de cada alternativa para cada criterio, así como el VTP obtenido; mientras que la Figura 17 ofrece un gráfico de las puntuaciones. Para obtener las calificaciones se ha utilizado la Ecuación (1) para los criterios a minimizar (consumo, sensibilidad y coste) y la Ecuación (2) para los criterios a maximizar (rango de detección y campo de visión).

### 5.3.2.3. Solución escogida

Por tanto, se selecciona el sensor PIR modelo EKMB1306112K, cuyo *datasheet* se encuentra en [30].

## 5.3.3. Fotoresistor

### 5.3.3.1. Criterios

Los criterios a considerar en la evaluación de las alternativas, ordenados de mayor a menor importancia, son:

- *Tiempo de lectura mínimo*. Es el criterio con mayor importancia debido a que el tiempo de lectura tiene implicación directa con el retardo entre detección de lince ibérico y fotografía. Su peso es del 50%.
- *Consumo*. Su peso es del 20%.
- *Coste económico*. Su peso es del 20%.
- *lux máximos*. Cantidad de iluminación que es capaz de medir el fotoresistor. Como la decisión de activar flash o no se da en condiciones de escasa luminosidad ambiental, es un criterio que carece de importancia. Aunque un valor alto permite añadir funciones de ajuste del sensor de imagen en función de la luminosidad ambiental. Su peso es del 10%.

En la Tabla 9 se resumen los diferentes criterios con sus respectivos pesos.

	Tiempo de lectura mínimo	Consumo	Coste económico	lux máximos
<b>Peso</b>	50%	20%	20%	10%

**Tabla 9.** Criterios y sus respectivos pesos en la selección de fotoresistor.

### 5.3.3.2. Alternativas

La Tabla 10 muestra los valores de cada criterio para cada una de las tres alternativas consideradas.

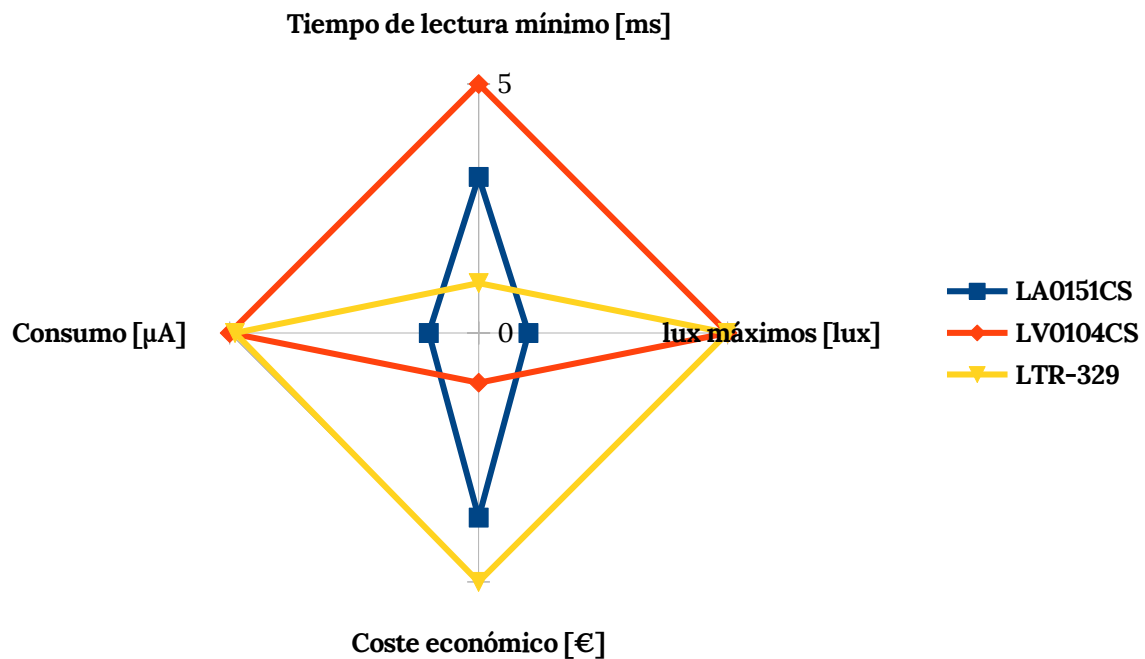
	LA0151CS	LV0104CS	LTR-329
<b>Tiempo de lectura mínimo [ms]</b>	30	12,5	50
<b>Consumo [<math>\mu</math>A]</b>	150	1	5
<b>Coste [€]</b>	1,24	1,87	0,94
<b>lux máximos [lux]</b>	3000	64000	64000

**Tabla 10.** Valores de los criterios para cada alternativa de fotoresistor.

	Peso [%]	LA0151CS	LV0104CS	LTR-329
<b>Tiempo de lectura mínimo [ms]</b>	50	3,1	5	1
<b>Consumo [<math>\mu</math>A]</b>	20	1	5	4,9
<b>Coste económico [€]</b>	20	3,7	1	5
<b>lux máximos [lux]</b>	10	1	5	5
<b>Valor Técnico Ponderado [VTP]</b>		2,6	4,2	2,9

**Tabla 11.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de fotoresistor para cada criterio considerado.

La Tabla 11 muestra las calificaciones -del 1 (peor puntuación) al 5 (mejor puntuación)- de cada alternativa para cada criterio, así como el VTP obtenido; mientras que la Figura 18 ofrece un gráfico de las puntuaciones. Para obtener las calificaciones se ha utilizado la Ecuación (1) para los criterios a minimizar (tiempo de lectura mínimo, consumo y coste) y la Ecuación (2) para los criterios a maximizar (lux máximos).



**Figura 18.** Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de fotoresistor para cada criterio considerado.

### 5.3.3.3. Solución escogida

Por tanto, se selecciona el fotoresistor modelo LV0104CS-TLM-H, cuyo *datasheet* se encuentra en [31].

## 5.3.4. LED

### 5.3.4.1. Criterios

Los criterios a considerar en la evaluación de las alternativas, ordenados de mayor a menor importancia, son:

- *Intensidad radiante.* Factor que indica la potencia del LED. Dado que es necesario conseguir un flash con potencia radiante de más de 2000 mW/sr para correctas fotografías en condiciones de baja luminosidad, es el factor con mayor importancia, ya que a mayor intensidad radiante, menor número de LED para generar el flash. Su peso es del 40%.
- *Longitud de onda.* Siempre y cuando se enmarque dentro del espectro infrarrojo, una menor longitud de onda implica mejores prestaciones del



sensor de imagen, ya que la eficiencia cuántica tiende a empeorar conforme aumenta la longitud de onda. Su peso es del 30%.

- *Coste económico.* Refleja el coste económico total, y no unitario, para generar un flash con una potencia radiante de 2300 mW/sr. Su peso es del 20%.
- *Consumo.* Dado que los LED funcionan durante un instante de tiempo al lanzar una fotografía, su consumo tiene poca importancia. Su peso es del 10%.

	Intensidad radiante	Longitud de onda	Coste económico	Consumo
<b>Peso</b>	40%	30%	20%	10%

**Tabla 12.** Criterios y sus respectivos pesos en la selección de LED.

En la Tabla 12 se resumen los diferentes criterios con sus respectivos pesos.

### 5.3.4.2. Alternativas

La Tabla 13 muestra los valores de cada criterio para cada una de las tres alternativas consideradas.

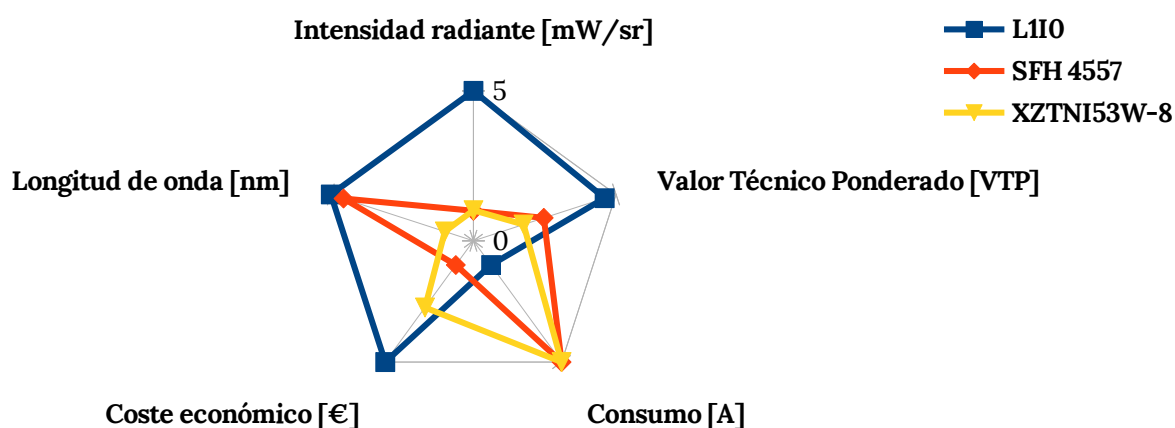
	L110	SFH 4557	XZTNI53W-8
<b>Intensidad radiante [mW/sr]</b>	1150	55	60
<b>Longitud de onda [nm]</b>	850	860	940
<b>Coste [€]</b>	7,3	28,98	19,5
<b>Consumo [A]</b>	1	0,1	0,1

**Tabla 13.** Valores de los criterios para cada alternativa de LED.

	Peso [%]	L110	SFH 4557	XZTNI53W-8
<b>Intensidad radiante [mW/sr]</b>	40	5	1	1,01
<b>Longitud de onda [nm]</b>	30	5	4,5	1
<b>Coste [€]</b>	20	5	1	2,7
<b>Consumo [A]</b>	10	1	5	5
<b>Valor Técnico Ponderado [VTP]</b>		4,6	2,4	1,7

**Tabla 14.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de LED para cada criterio considerado.

La Tabla 14 muestra las calificaciones -del 1 (peor puntuación) al 5 (mejor puntuación)- de cada alternativa para cada criterio, así como el VTP obtenido; mientras que la Figura 19 ofrece un gráfico de las puntuaciones. Para obtener las calificaciones se ha utilizado la Ecuación (1) para los criterios a minimizar (longitud de onda, consumo y coste) y la Ecuación (2) para el criterio a maximizar (intensidad radiante).



**Figura 19.** Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de LED para cada criterio considerado.

### 5.3.4.3. Solución escogida

Por tanto, el LED seleccionado es el modelo L1I0-08500600000000, cuyo *datasheet* se encuentra en [32]. Se colocan dos LED en serie para generar el flash. Al posicionarlos en serie, el consumo no aumenta, por lo que necesitan una corriente de 1 A para generar el flash a la intensidad radiante máxima.

Para activar los LED, se utiliza el transistor cuyo *datasheet* se encuentra en [33].

### 5.3.5. Módulo de comunicación por radiofrecuencia

El módulo debe ser capaz de emitir en un rango de frecuencias válido (que no esté utilizado por ningún otro servicio como la televisión, la telefonía móvil...) y su rango de emisión/recepción debe ser lo suficientemente grande como para que dado un territorio de estudio de la población de lince ibérico, permita instalar la red de cámaras trampa con la distancia adecuada entre nodos.

El rango de emisión/recepción no es un dato dado directamente por el fabricante, ya que este depende del entorno. No tiene el mismo rango un módulo instalado en una ciudad, donde los edificios atenúan enormemente la señal y, por tanto, disminuyen el rango; que instalado en el campo o bosque donde la atenuación es mínima. Según [34], el rango depende de la sensibilidad del receptor, de la potencia de transmisión del emisor, de la ganancia de las antenas (emisoras y receptoras) y de las pérdidas por el camino, que son función de la distancia.

Se utiliza la Ecuación (3) para el cálculo del rango de emisión/recepción de los módulos, donde  $P_{RX}$  es la sensibilidad de recepción, expresada en dBm;  $P_{TX}$  es la potencia de transmisión, expresada en dBm;  $G_{TX}$  y  $G_{RX}$  son las ganancias de las antenas emisoras y receptoras, respectivamente, expresadas en dBi;  $L_{FS}$  las pérdidas por el camino, expresadas en dB;  $d$  la distancia entre emisor y receptor, expresada en m;  $f$  la frecuencia de emisión, expresada en Hz; y  $c$  la velocidad de la luz, en m/s.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{FS} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right) \quad (3)$$

En las alternativas se expresa directamente el rango de emisión/recepción del módulo en cuestión, calculado a partir de los datos proporcionados por el fabricante en el *datasheet* y de la Ecuación (3).

#### 5.3.5.1. Criterios

Los criterios a considerar en la evaluación de las alternativas, ordenados de mayor a menor importancia, son:

- *Rango*. El rango entre emisor/receptor para una comunicación. Es el criterio más importante ya que cuanto mayor sea, más facilidad tendrá la red sensorial en transmitir todos los datos de manera satisfactoria, y más robusta será la red frente a fallos de nodos. Su peso es del 40%.

- *Consumo en recepción.* Consumo del módulo cuando recibe datos. Su peso es del 20%.
- *Consumo en transmisión.* Consumo del módulo cuando envía datos. Su peso es del 20%.
- *Coste económico.* Su peso es del 20%.

En la Tabla 15 se resumen los diferentes criterios con sus respectivos pesos.

	Rango	Consumo en recepción	Consumo en transmisión	Coste económico
<b>Peso</b>	40%	20%	20%	20%

**Tabla 15.** Criterios y sus respectivos pesos en la selección de módulo de comunicación por radiofrecuencia.

### 5.3.5.2. Alternativas

La Tabla 16 muestra los valores de cada criterio para cada una de las tres alternativas consideradas.

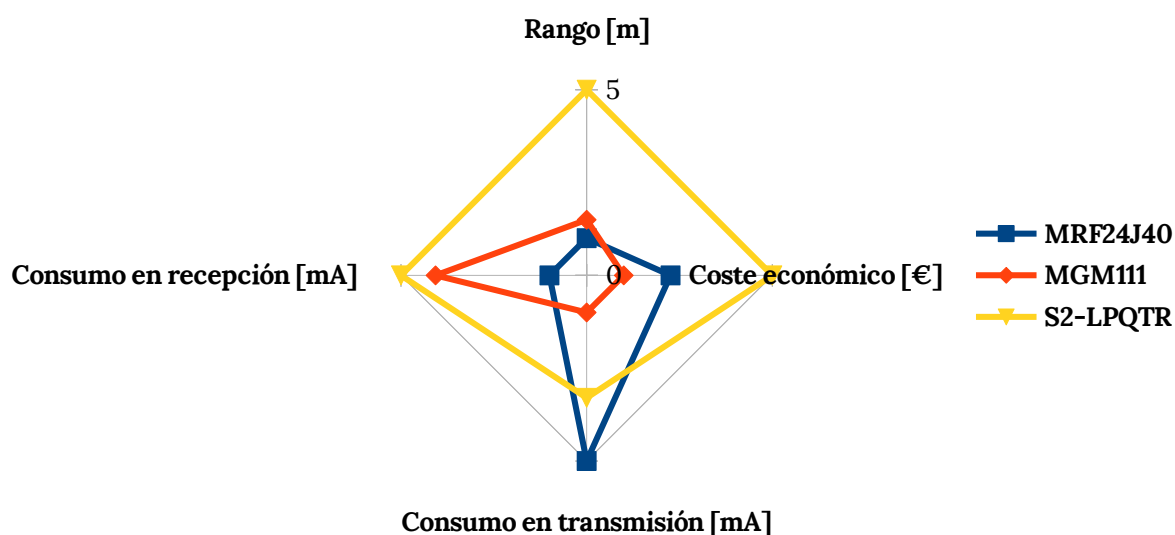
	MRF24J40	MGM111	S2-LPQTR
<b>Rango [m]</b>	498	1100	5352
<b>Consumo en recepción [mA]</b>	19	9,8	7
<b>Consumo en transmisión [mA]</b>	23	32,7	27
<b>Coste [€]</b>	8,21	10,75	2,68

**Tabla 16.** Valores de los criterios para cada alternativa de módulo de transmisión por radiofrecuencia.

La Tabla 17 muestra las calificaciones -del 1 (peor puntuación) al 5 (mejor puntuación)- de cada alternativa para cada criterio, así como el VTP obtenido; mientras que la Figura 20 ofrece un gráfico de las puntuaciones. Para obtener las calificaciones se ha utilizado la Ecuación (1) para los criterios a minimizar (consumos y coste) y la Ecuación (2) para el criterio a maximizar (rango).

	Peso [%]	MRF24J40	MGM111	S2-LPQTR
Rango [m]	40	1	1,5	5
Consumo en recepción [mA]	20	1	4	5
Consumo en transmisión [mA]	20	5	1	3,5
Coste [€]	20	2,2	1	5
Valor Técnico Ponderado [VTP]		2	1,8	4,6

**Tabla 17.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de módulo de transmisión por radiofrecuencia para cada criterio considerado.



**Figura 20.** Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de módulo de transmisión por radiofrecuencia para cada criterio considerado.

### 5.3.5.3. Solución escogida

Por tanto, se selecciona el módulo de comunicación por radiofrecuencia modelo S2-LPQTR, del fabricante STMicroelectronics, cuyo *datasheet* se encuentra en [35].

## 5.3.6. Batería

### 5.3.6.1. Criterios

Los criterios a considerar en la evaluación de las alternativas, ordenados de mayor a menor importancia, son:

- *Capacidad*. Define la autonomía de la batería. Su peso es del 50%.
- *Coste económico*. Refleja el coste total, y no unitario, que supone montar una celda de baterías a partir del modelo de batería. Su peso es del 25%.
- *Corriente máxima*. Una mayor corriente máxima implica menos celdas de batería en paralelo para poder satisfacer la necesidad del LED escogido (1 A). Su peso es del 25%.

En la Tabla 18 se resumen los diferentes criterios con sus respectivos pesos.

	Capacidad	Coste económico	Corriente máxima
Peso	50%	25%	25%

**Tabla 18.** Criterios y sus respectivos pesos en la selección de batería.

### 5.3.6.2. Alternativas

La Tabla 19 muestra los valores de cada criterio para cada una de las tres alternativas consideradas.

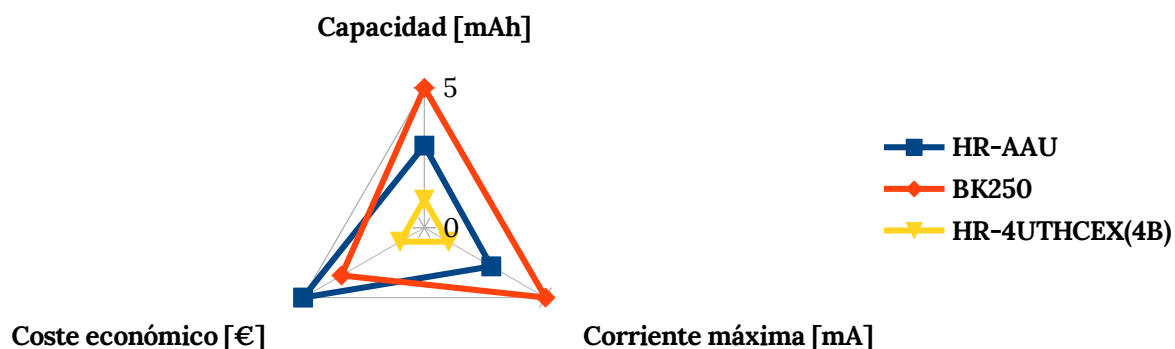
	HR-AAU	BK250	HR-4UTHCEX
Capacidad [mAh]	1650	2450	900
Coste [€]	36	37,52	39,84
Corriente máxima [mA]	300	490	150

**Tabla 19.** Valores de los criterios para cada alternativa de batería.

La Tabla 20 muestra las calificaciones -del 1 (peor puntuación) al 5 (mejor puntuación)- de cada alternativa para cada criterio, así como el VTP obtenido; mientras que la Figura 21 ofrece un gráfico de las puntuaciones. Para obtener las calificaciones se ha utilizado la Ecuación (1) para el criterio a minimizar (coste) y la Ecuación (2) para los criterios a maximizar (capacidad y corriente máxima).

	Peso [%]	HR-AAU	BK250	HR-4UTHCEX
Capacidad [mAh]	50	2,9	5	1
Coste [€]	25	5	3,4	1
Corriente máxima [mA]	25	2,7	5	1
Valor Técnico Ponderado [VTP]		3,4	4,6	1

**Tabla 20.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de batería para cada criterio considerado.



**Figura 21.** Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de batería para cada criterio considerado.

### 5.3.6.3. Solución escogida

Por tanto, se selecciona la batería modelo BK250A del fabricante Panasonic, cuyo *datasheet* se encuentra en [36].

Se ubican cuatro celdas de esta batería en serie, con dos ramas en paralelo, para satisfacer las necesidades de amperaje de los LED.

### 5.3.7. Convertidor de potencia

#### 5.3.7.1. Requisitos

El convertidor de potencia es un componente secundario que no da lugar a valorarlo con multitud de criterios. No obstante, sí debe cumplir ciertos requisitos.

Los requisitos indispensables que debe cumplir el convertidor de potencia son los siguientes:

- Voltaje de salida de 3,3 V (voltaje único de alimentación de todos los componentes).

- Debe admitir un voltaje de entrada mínimo de 4 V (es el mínimo voltaje que ofrece la batería en situación de mínima carga).
- Debe admitir un voltaje de entrada máximo de 5,5 V (es el máximo voltaje que ofrece la batería en situación de máxima carga).
- Corriente máxima de, al menos, 1 A, para satisfacer los requerimientos de los LED.

El coste económico y la eficiencia, si bien pueden considerarse como criterios para seleccionar uno u otro modelo, son muy parecidos entre los diferentes modelos encontrados en el mercado, por lo que se procede a escoger aquel con el menor coste, sin necesidad de entrar en profunda comparación de alternativas

### 5.3.7.2. Solución escogida

El convertidor de potencia escogido es el modelo XCL220B333FR-G, del fabricante Torex Semiconductor. Cumple punto por punto los requisitos previamente especificados. Se trata de un convertidor buck (reductor), cuyo *datasheet* se puede encontrar en [37].

### 5.3.8. Tarjeta de memoria

La tarjeta de memoria puede ser, primordialmente, de dos tipos:

- No volátil.
- Volátil.

Las memorias no volátiles más utilizadas en la electrónica son las tarjetas SD (Secure Digital), cuyo estándar está ampliamente extendido en telefonía, cámaras digitales, ordenadores y, en general, en cualquier dispositivo electrónico portátil. Entre sus ventajas se encuentran la facilidad de uso y la no necesidad de alimentar a la memoria indefinidamente, pues tal y como su propio nombre indica, su información no desaparece a menos que sea reescrita; mientras que su mayor desventaja es la reducida velocidad de lectura/escritura.

Las memorias volátiles, como la RAM (Random Access Memory), ofrecen más velocidad ya que utilizan comunicación en paralelo con el  $\mu$ controlador; sin embargo, al utilizar comunicación en paralelo y no en serie como las tarjetas SD, requieren de



más pines para su comunicación con el  $\mu$ controlador y conllevan una mayor complejidad en su programación. Además de eso, requieren de alimentación continua, implicando un mayor consumo.

### 5.3.8.1. Solución escogida

Pese a que las memorias RAM ofrecen mayor velocidad, garantizando un menor retardo de detección/disparo de fotografía, las tarjetas de memoria SD ofrecen una mayor sencillez a la hora de programar y comunicarse con el  $\mu$ controlador, por lo que finalmente se selecciona una tarjeta SD como memoria de la cámara trampa.

Las diferencias entre modelos comerciales de tarjetas de memoria SD son muy pequeñas, ya que todas comparten mismo estándar, por lo que comparar modelos carece de interés. Aunque existen de diferentes tamaños, incluso el tipo de tarjeta SD de mayor tamaño es válido para la cámara trampa, ya que solo implica un tamaño de 32x24 mm.

El modelo seleccionado es el AF4GSD3A-OEM, del fabricante ATP Electronics. Es una tarjeta de memoria SD de clase 10, que garantiza una velocidad mínima de 10MB/s. El *datasheet* de la memoria se encuentra en [38].

### 5.3.9. Panel fotovoltaico

#### 5.3.9.1. Criterios

Los criterios a considerar en la selección de panel fotovoltaico son escasos, motivo por el cual no se utiliza el método del valor técnico ponderado, sino que se utiliza el método de ventajas-inconvenientes, que es más simple y adecuado para este caso.

Los tres únicos criterios a considerar son:

- *Voltaje*. Para una correcta carga de la batería, el voltaje proporcionado por el panel fotovoltaico debe ser de, como mínimo, 5,6 V.
- *Corriente*. Una mayor corriente proporcionada por el panel fotovoltaico implica una carga más rápida de la batería.
- *Coste económico*.

### 5.3.9.2. Alternativas

Las dos únicas alternativas consideradas están presentes en la Tabla 21.

	SM531K10L	V-4304-1
Voltaje [V]	5,6	6,06
Corriente [mA]	205	178
Coste económico [€]	16,18	31,07

**Tabla 21.** Dos alternativas consideradas en la selección de panel fotovoltaico.

### 5.3.9.3. Solución escogida

Por tanto, el panel fotovoltaico escogido es el modelo SM531K10L del fabricante IXYS, cuyo *datasheet* se encuentra en [39]. No solo conlleva un menor coste económico, sino que también proporciona una mayor corriente, con la subsiguiente carga más rápida de la batería.

Para una carga más veloz de las baterías se ubican dos paneles fotovoltaicos en paralelo.

## 5.3.10. $\mu$ controlador

### 5.3.10.1. Criterios

Los criterios a considerar para la selección de modelo de  $\mu$ C son:

- *Número de entradas/salidas.* Es función del resto de componentes. Se necesitan un mínimo de 36 entradas/salidas, aunque cuantas más entradas/salidas tenga el  $\mu$ controlador más futuras ampliaciones se pueden hacer sin necesidad de cambiar de modelo del mismo. Su peso es del 25%.
- *Memoria de programa.* Limita la capacidad del software a programar en el  $\mu$ C. Un valor alto permite mayor flexibilidad y mayores funcionalidades del software a diseñar. Su peso es del 25%.
- *Velocidad del procesador.* Indica la rapidez con la que el  $\mu$ C ejecuta las instrucciones. Su peso es del 25%.

- *Coste económico*. Su peso es del 25%.

En la Tabla 22 se resumen los diferentes criterios con sus respectivos pesos.

	Número de entradas/salidas	Memoria de programa	Velocidad del procesador	Coste económico
<b>Peso</b>	25%	25%	25%	25%

Tabla 22. Criterios y sus respectivos pesos en la selección de  $\mu$ C.

### 5.3.10.2. Alternativas

La Tabla 23 muestra los valores de cada criterio para cada una de las tres alternativas consideradas.

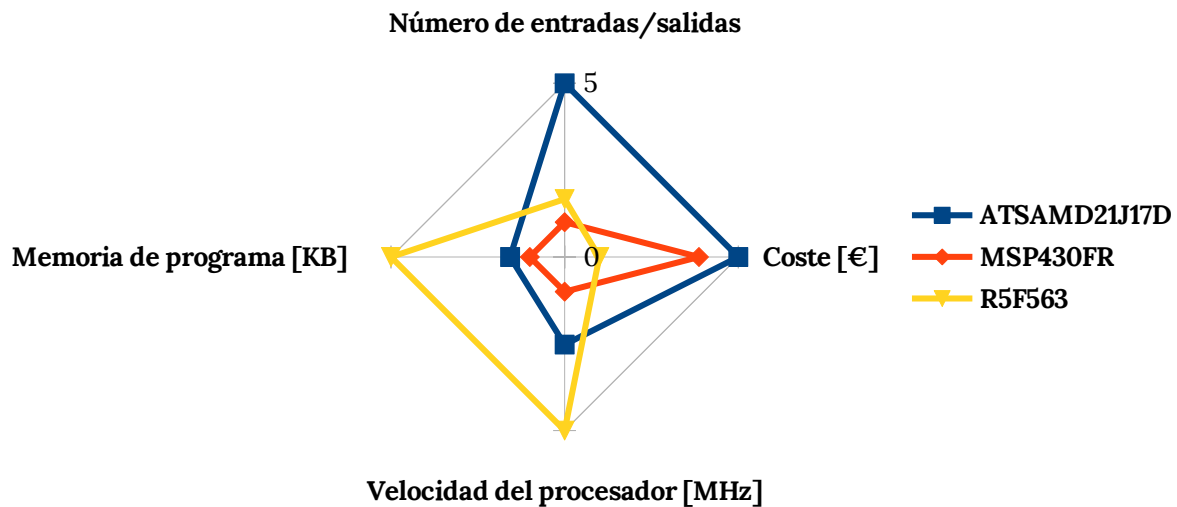
	ATSAMD21J17D	MSP430FR	R5F563
<b>Número de entradas/salidas</b>	52	40	42
<b>Memoria de programa [KB]</b>	128	64	512
<b>Velocidad del procesador [MHz]</b>	48	16	100
<b>Coste [€]</b>	2,11	4,3	9,84

**Tabla 23.** Valores de los criterios para cada alternativa de  $\mu$ C.

La Tabla 24 muestra las calificaciones -del 1 (peor puntuación) al 5 (mejor puntuación)- de cada alternativa para cada criterio, así como el VTP obtenido; mientras que la Figura 22 ofrece un gráfico de las puntuaciones. Para obtener las calificaciones se ha utilizado la Ecuación (1) para el criterio a minimizar (coste) y la Ecuación (2) para los criterios a maximizar (número de entradas/salidas, memoria de programa y velocidad del procesador).

	Peso [%]	ATSAMD21J17D	MSP430FR	R5F563
<b>Número de entradas/salidas</b>	25	5	1	1,6
<b>Memoria de programa [KB]</b>	25	1,5	1	5
<b>Velocidad del procesador [MHz]</b>	25	2,5	1	5
<b>Coste [€]</b>	25	5	3,8	1
<b>Valor Técnico Ponderado [VTP]</b>		3,5	1,7	3,1

**Tabla 24.** Calificaciones y VTP de cada alternativa de  $\mu$ C para cada criterio considerado.



**Figura 22.** Puntuaciones (del 1 al 5) de cada alternativa de  $\mu$ C para cada criterio considerado.

### 5.3.10.3. Solución escogida

Por tanto, el  $\mu$ C seleccionado es el modelo ATSAMD21J17D, del fabricante Microchip Technology, cuyo *datasheet*, utilizado como referencia para la programación del software de la cámara trampa, se encuentra en [40].

Para poder generar un *reset* al  $\mu$ C, se instala el interruptor modelo KS-01Q-01 del fabricante E-Switch.

## 5.3.11. Lente

### 5.3.11.1. Criterios

Los criterios a considerar en la selección de lente para el sensor de imagen son escasos, motivo por el cual no se utiliza el método del valor técnico ponderado, sino que se utiliza el método de ventajas-inconvenientes, que es más simple y adecuado para este caso.

Los tres únicos criterios a considerar son:

- *Distancia focal.* Una alta distancia focal permite una amplia visión, mientras que una reducida distancia focal implica un campo de visión reducido, pero un mejor enfoque de objetos lejanos. Se fija un valor de 4 mm, que es el más utilizado por teléfonos móviles y cámaras digitales estándar.
- *Campo de visión.* Para una mejor función de la cámara trampa, es interesante que coincida con el campo de visión del sensor infrarrojo pasivo y de los LED, es decir, en unos 60°.
- *Coste económico.*

### 5.3.11.2. Alternativas

Bajo estos criterios y la imposición de un campo de visión de aproximadamente 60° y una distancia focal de 4 mm, las dos únicas alternativas consideradas están presentes en la Tabla 25.

	VL-4018	V-4304-1
<b>Distancia focal [mm]</b>	4	4
<b>Ángulo de visión [°]</b>	51,9x68,8	52x70,1
<b>Coste económico [€]</b>	45	27,15

**Tabla 25.** Dos alternativas consideradas en la selección de lente.

### 5.3.11.3. Solución escogida

Finalmente, el modelo V-4304-1 del fabricante Marshall es la lente seleccionado, ya que no solo proporciona un mayor ángulo de visión para la misma distancia focal, sino que también conlleva un coste económico de casi la mitad.

El *datasheet* de la lente se encuentran en [41]; mientras que el soporte de la lente utilizado es el recomendado por el mismo fabricante, cuyo *datasheet* se encuentra en [42].

### 5.3.12. Carcasa

La carcasa a diseñar debe ser cumplir las siguientes características:

- *Protección frente a la lluvia.* Es importante que el la carcasa ofrezca impermeabilidad frente al agua, ya que la cámara trampa está expuesta al aire libre y no debe ser dañada por el agua de lluvia.
- *Protección frente a robos.* En aquel territorio que sea público, para evitar robos de la cámara trampa, la carcasa debe ofrecer cierto grado de camuflaje.
- *Protección frente a daños.* La carcasa debe ofrecer protección frente a cualquier origen de daños que pueda tener.

#### 5.3.12.1. Alternativas de diseño

Teniendo presentes los requisitos que debe cumplir la carcasa de la cámara trampa, se consideran dos alternativas de diseño:

- *Cámara trampa estacionada en el suelo.* En esta alternativa, la cámara trampa es depositada directamente en el suelo, con la ayuda de un soporte que ofrezca estabilidad y rigidez.
- *Cámara trampa atada a un árbol o a un poste.* Un diseño similar a los modelos comerciales de cámaras trampa [43], la cámara es atada mediante una cuerda elástica a un árbol o a un poste.

La segunda alternativa resulta más adecuada ya que, primeramente, evita cualquier posible daño debido a agua inundada debido a fuertes lluvias. Aunque la carcasa debe ser capaz de resistir el agua de la lluvia, no se garantiza en el diseño que pueda resistir gran cantidad de agua estancada, como sería el caso de una inundación. Además, al estar la cámara atada a un árbol o poste, las fotografías se lanzan desde una cierta altura, lo que facilita la identificación de lince ibéricos a partir de las mismas.

Si bien el viento puede ser una fuente de posibles daños para la segunda alternativa, tal y como se comenta en la Sección 2.2, los vientos en las zonas donde habita el lince ibérico no son elevados, por lo que no es un factor importante.

### 5.3.12.2. Alternativas de material

Basado en los materiales utilizados para las carcasas de teléfonos móviles, las dos alternativas principales son [44]:

- *Aluminio*. Es el material que ofrece mayor protección frente a daños. Al ser buen conductor térmico, evita sobrecalentamientos en la carcasa debido a los componentes electrónicos internos. Su principal desventaja es su mayor coste económico. No obstante, y referente al diseño del presente Proyecto, el aluminio atenúa las ondas de radiofrecuencia.
- *Polycarbonato*. Más habitual en teléfonos móviles y cámaras de gama baja, ofrece primordialmente un bajo coste económico a cambio de menos resistencia estructural. El polycarbonato no es buen conductor térmico, por lo que posibles sobrecalentamientos pueden ser ocasionados. No atenúa las ondas de radiofrecuencia.

Si bien ambas opciones presentan un buen balance de ventajas-desventajas, aunque con características bien diversas, la primera alternativa, es decir, el aluminio, es más adecuado para la carcasa dado que ofrece mayor protección frente a posibles daños.

Aunque el aluminio atenúa las ondas de radiofrecuencia, debido al módulo utilizado, que ofrece un rango de 5352 m, valor más que suficiente, no es una desventaja lo suficientemente importante como para descartar dicho material.

### 5.3.12.3. Solución escogida

Por tanto, la solución tecnológica escogida para diseñar la carcasa consiste en un diseño de aluminio que se puede atar mediante cuerda elástica a un árbol o poste.

La carcasa se divide en dos partes (carcasa delantera y carcasa trasera) que, mediante tornillería y juntas de fieltro, aporta estanqueidad al diseño.

La producción de las piezas de la carcasa se externaliza al taller mecánico Tamega, que realiza el diseño en concordancia con los planos. El coste de las piezas queda plasmado en el presupuesto.

La pintura de la carcasa es realizada por el mismo taller mecánico. La pintura debe proteger a la carcasa de protección contra la oxidación y debe ofrecer camuflaje, por lo que un patrón de color militar es requerido.

Con el fin de reducir costes y de realizar un diseño más sencillo, el botón de reset del  $\mu$ C queda ubicado en la misma PCB y no en el exterior de la carcasa. Esto implica que durante la instalación de una cámara trampa, es necesario abrir la carcasa trasera y pulsar el pulsador de reset, con su posterior montaje, para una correcta instalación.

En caso de que no haya presencia de árboles para atar la cámara trampa, se dispone de un poste de madera, del vendedor de bricolaje ManoMano, con referencia ME1823574. La cuerda elástica para atar la cámara trama se compra en también en ManoMano, con referencia ME1744505.

## 5.4. PCB

El diseño de la placa de circuito impreso, más popularmente conocida como PCB por sus siglas en inglés *Printed Circuit Board*, se externaliza a la empresa Novatek, que la diseña a partir del diagrama electrónico realizado y de las restricciones impuestas, presentes en los planos. El coste del diseño de la PCB queda reflejado en los presupuestos.

## 5.5. Software

La reproducción completa del programa del  $\mu$ C que otorga la función deseada a la cámara trampa se encuentra en el Anexo I. Sin embargo, a continuación se ofrece una explicación resumida del funcionamiento.

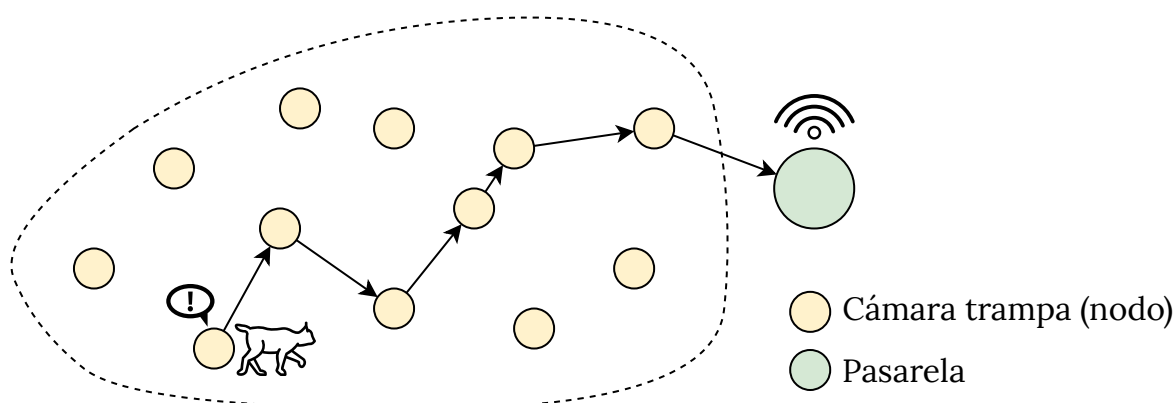
Por defecto, y una vez realizado el reset con su posterior configuración inicial, la cámara trampa, junto con el resto de componentes (excepto el sensor PIR), se encuentran en estado dormido. Cada fotografía es guardada en la tarjeta de memoria junto con un identificador de la cámara que ha realizado dicha fotografía y la fecha y hora del evento. El  $\mu$ C se despierta debido a tres posibles fuentes:

- *Detección de lince ibérico*. Cuando un lince ibérico (o cualquier otro animal u objeto) es detectado por el sensor PIR, el  $\mu$ C despierta, activa los componentes pertinentes, captura la fotografía, la almacena en la tarjeta de memoria (pero no la envía) y vuelve a dormir a la cámara trampa.



- *Envío de datos.* Una vez al día, a la hora preconfigurada, el  $\mu C$  despierta, activa los componentes pertinentes y envía los datos que tiene almacenados en la tarjeta de memoria. Cuando recibe el *acknowledge* por parte otra cámara trampa, borra los datos. Después, haya recibido el *acknowledge* o no, vuelve a dormir a la cámara trampa.
- *Recepción de datos.* Cuando el módulo de comunicación por radiofrecuencia detecta una recepción de datos, despierta al  $\mu C$  y guarda los datos en la tarjeta de memoria SD. Sin embargo, para evitar bucles de datos, si lo que se está recibiendo lleva el mismo identificador de cámara que la propia cámara trampa, no guarda los datos. Independientemente de si se han guardado los datos o no, se envía el *acknowledge* y vuelve a dormir a la cámara trampa.

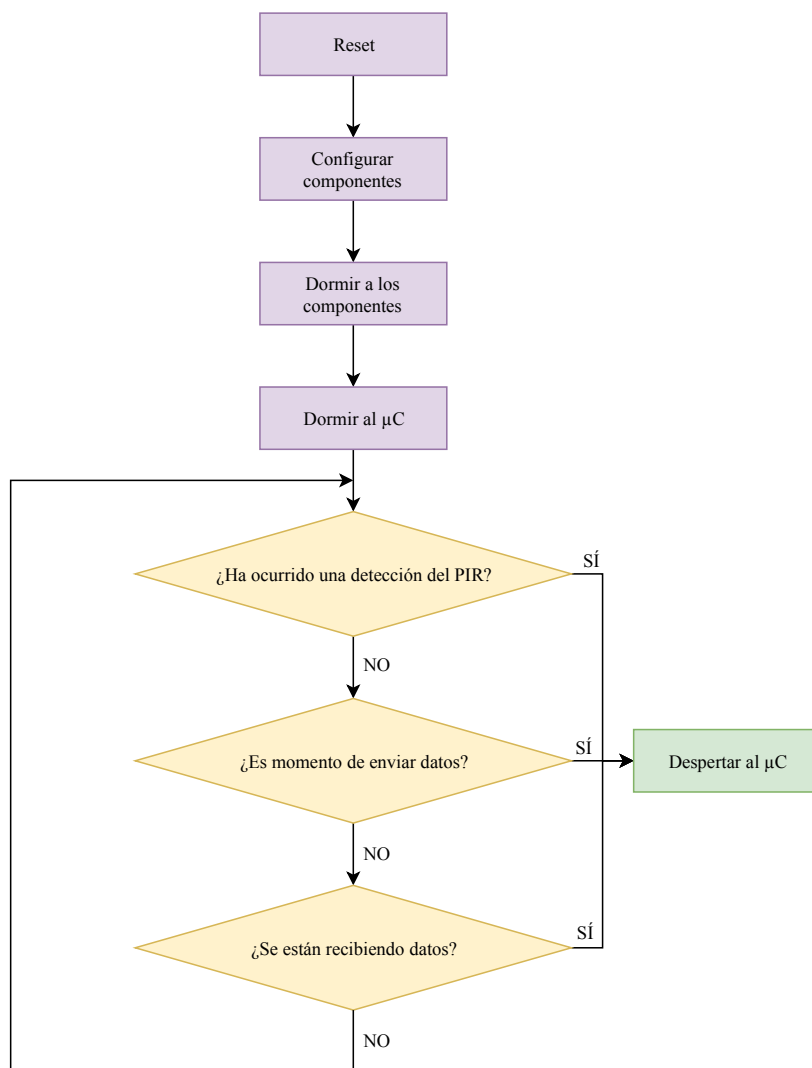
Por tanto, el envío de información a través de la red sensorial se realiza nodo a nodo, igual que sucede en el proyecto TigerCENSE, tal y como se observa en la Figura 23.



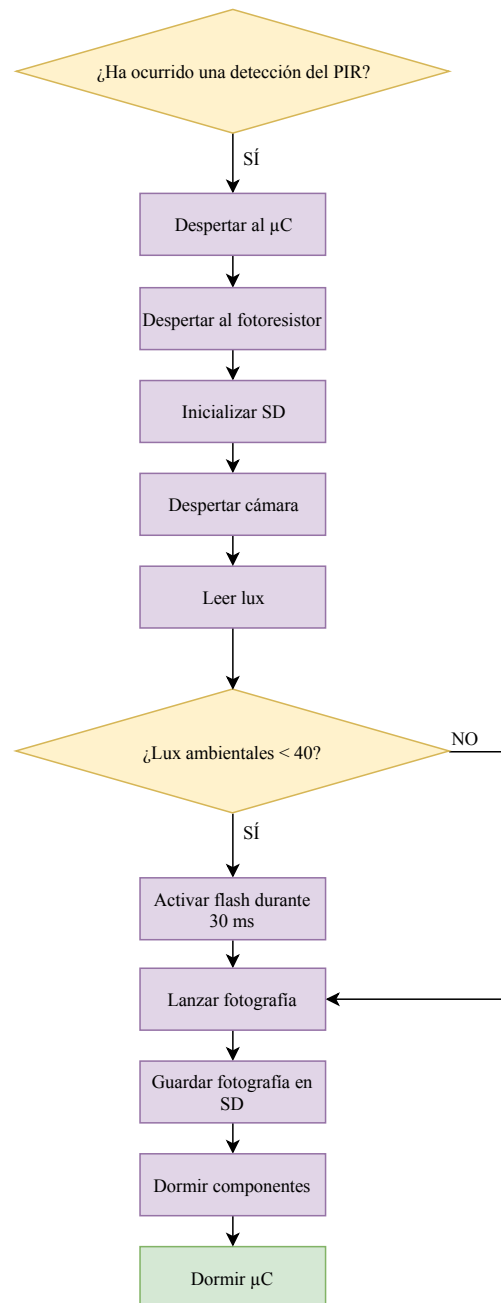
**Figura 23.** Arquitectura de comunicación en la cámara trampa diseñada.

En las siguientes figuras se ofrece una réplica esquemática del funcionamiento del programa del microcontrolador, que permite una rápida comprensión del funcionamiento de la cámara.

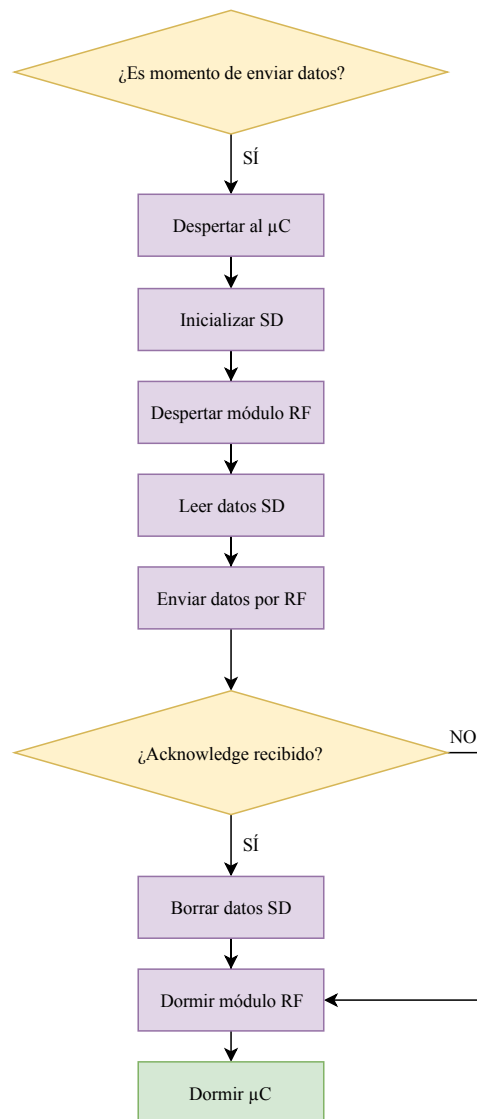
En la Figura 24 se ilustra el funcionamiento del programa principal del  $\mu C$ , las funciones del  $\mu C$  cuando una detección de lince ibérico ha sido hecha se muestra en la Figura 25, en la Figura 26 se muestra el procedimiento de envío de datos por radiofrecuencia y en la Figura 27 se observa el funcionamiento cuando una recepción de datos es detectada.



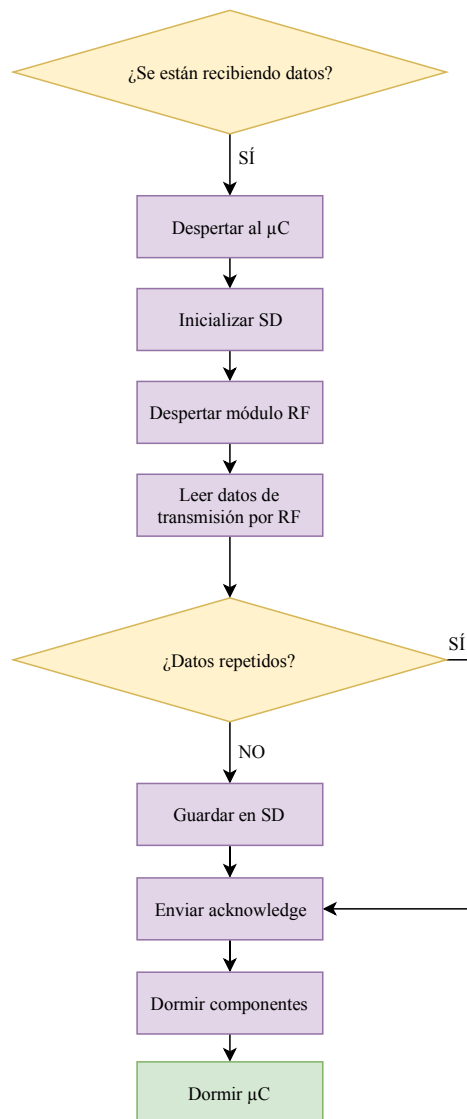
**Figura 24.** Funcionamiento de la función principal del µC.



**Figura 25.** Funcionamiento tras una interrupción por detección de lince ibérico.



**Figura 26.** Funcionamiento tras interrupción por envío de datos.



**Figura 27.** Funcionamiento tras interrupción por recepción de datos.

## Capítulo 6. Instalación de la red

La metodología de instalación de la red sensorial a partir de la cámara trampa, tal y como se ha comentado en el Capítulo 4 es más un arte que una ciencia. Sin embargo, se reproduce en el presente capítulo la metodología a emplear en la instalación de una red de 1000 cámaras trampa.

Para la instalación de la red, un biólogo es requerido para conllevar un profundo estudio del territorio en donde se va a instalar la red, con la finalidad de establecer aquellos puntos donde es probable que habiten lince ibéricos, para favorecer un mejor ratio de detección.

Las cámaras trampa deben disponerse de tal forma que garantice la existencia de una cámara trampa cada 100 ha. Además, como la transmisión de información se realiza de nodo a nodo y debido a las características del módulo de radiofrecuencia, no puede existir ninguna cámara trampa sin otra a menos de 5000 m.

Un nodo final, que o bien puede ser una cámara trampa o un computador, es necesario para poder obtener los datos de toda la red sensorial. En caso de que se seleccione un computador, es necesario desarrollar el software adecuado para visualizar los datos. Si se elige una cámara trampa como nodo final, basta con recolectar la tarjeta de memoria de forma periódica.

Las cámaras trampa tienen la suficiente autonomía como para permitir un funcionamiento de 10 años de la red sensorial.

No es recomendable disponer la red de tal forma que solo exista un camino único para la transmisión de información, puesto que el fallo de un nodo causaría el fallo de la red entera.

Así pues, para una red de cámaras trampa de 1000 unidades, tal y como la tenida en cuenta en los presupuestos, el territorio máximo teórico de monitoreo es de 1000 km<sup>2</sup>, aunque es recomendable instalar la red en extensiones menores con el fin de cumplir con los susodichos consejos de empleo.

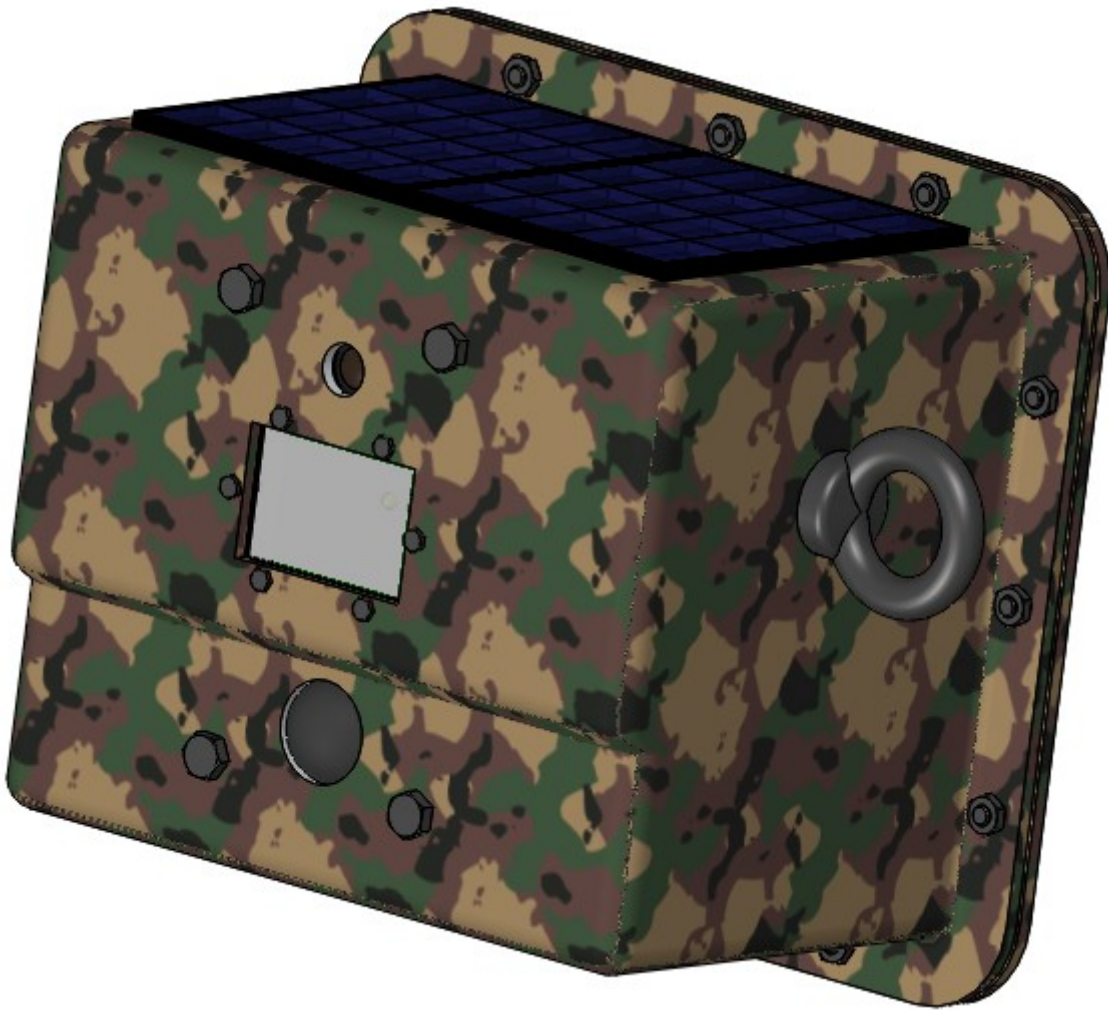
## Capítulo 7. Conclusiones

En la Tabla 26 se observan las características finales de la cámara trampa diseñada.

<b>Tipo de accionamiento</b>	Infrarrojo pasivo
<b>Sensor de imagen</b>	CMOS
<b>Retardo de captura de fotografía</b>	1,6 segundos
<b>Tipo de flash</b>	Infrarrojo (850 nm)
<b>N.º de LED utilizados para el flash</b>	2
<b>Potencia radiante del flash</b>	2300 mW/sr
<b>Modo de funcionamiento de los LED</b>	Modo pulso (30 ms)
<b>Disposición de los LED</b>	Serie
<b>Corriente consumida por los LED</b>	1 A
<b>Modo de transmisión de datos</b>	Multihop
<b>Tecnología de transmisión de datos</b>	Radiofrecuencia
<b>Alcance de transmisión de un nodo</b>	5 km
<b>Tarjeta de memoria</b>	SD 4 GB
<b>Convertidor DC-DC</b>	Buck
<b>Batería</b>	4x2 Nickel Metal Hydride
<b>Autonomía</b>	2 meses (recargable solarmente)
<b>Campo de visión</b>	60°
<b>Futuras mejoras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retardo de captura de fotografía de 250 ms</li> <li>• Tiempo entre dos capturas consecutivas de 1 s</li> <li>• Configuración remota</li> <li>• Mensaje de estado de salud periódico</li> </ul>

**Tabla 26.** Características finales de la cámara trampa diseñada.

Asimismo, en las siguientes Figuras se muestran fotografías de la cámara trampa modelada.

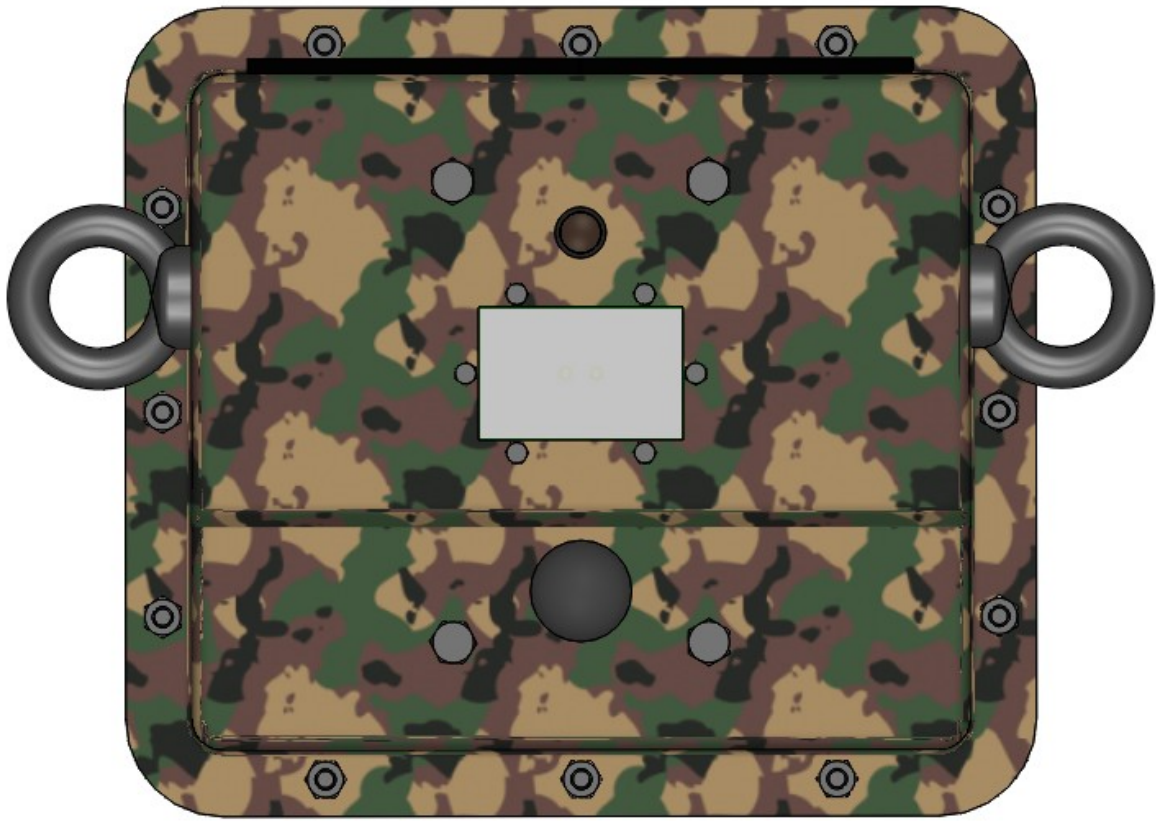


**Figura 28.** Modelo de la cámara trampa diseñada.

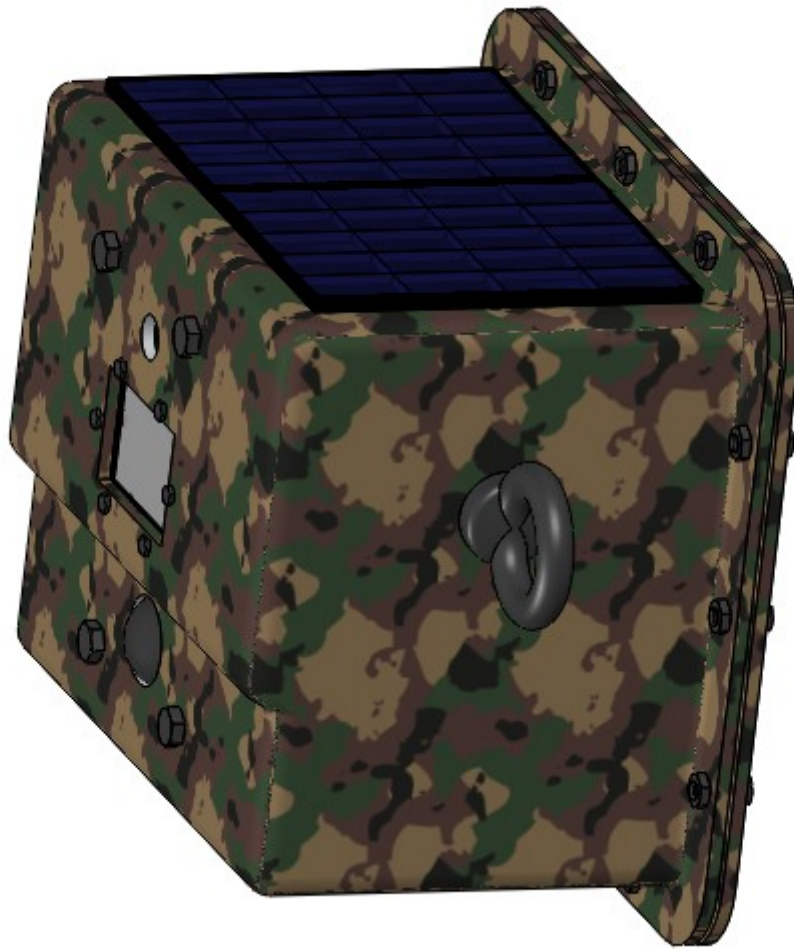




**Figura 29.** Modelo de la cámara trampa diseñada.



**Figura 30.** Modelo de la cámara trampa diseñada.



**Figura 31.** Modelo de la cámara trampa diseñada.

## Capítulo 8. Bibliografía

- [1] Iberlince, “El Gato Clavo,” vol. 56, pp. 1–11, 2018.
- [2] G. Garrote *et al.*, “Estimation of the Iberian lynx (*Lynx pardinus*) population in the Doñana area, SW Spain, using capture–recapture analysis of camera-trapping data,” *Eur. J. Wildl. Res.*, vol. 57, no. 2, pp. 355–362, 2010.
- [3] WWF, “Lince. La joya ibérica.” [Online]. Available: [https://web.archive.org/web/20190220172850/https%3A%2F%2Fwww.wwf.es%2Fnuestro\\_trabajo\\_%2Fespecies\\_y\\_habitats%2Flince\\_\\_la\\_joya\\_iberica\\_%2F](https://web.archive.org/web/20190220172850/https%3A%2F%2Fwww.wwf.es%2Fnuestro_trabajo_%2Fespecies_y_habitats%2Flince__la_joya_iberica_%2F). [Accessed: 20-Feb-2019].
- [4] Consejo Europeo, “Directiva 92/43/CEE del Consejo relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres,” *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*. p. 44, 1992.
- [5] F. Guil *et al.*, “Factors conditioning the camera-trapping efficiency for the Iberian lynx (*Lynx pardinus*),” *Eur. J. Wildl. Res.*, vol. 56, no. 4, pp. 633–640, 2010.
- [6] M. K. Soisalo and S. M. C. Cavalcanti, “Estimating the density of a jaguar population in the Brazilian Pantanal using camera-traps and capture–recapture sampling in combination with GPS radio-telemetry,” *Biol. Conserv.*, vol. 129, no. 4, pp. 487–496, 2006.
- [7] J. M. Barea-Azcón, E. Virgós, E. Ballesteros-Duperón, M. Moleón, and M. Chiroso, “Surveying carnivores at large spatial scales: a comparison of four broad-applied methods,” *Biodivers. Conserv.*, vol. 16, no. 4, pp. 1213–1230, 2006.
- [8] F. Guil *et al.*, “Use of Camera Trapping in Determining Iberian Lynx Population Parameters: The Use Area and Its Limitations,” *Wildl. Biol. Pract.*, vol. 6, no. 3, pp. 1–13, 2011.
- [9] Iberlince, “Lince ibérico - Ecología.” [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190221103402/http%3A%2F%2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Flince-iberico-esp%2Fecologia>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [10] Programa de conservación ex-situ del lince ibérico, “Temporada de Cría 2011.” [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190221104044/http%3A%2F>

- %2Fwww.lynxedsitu.es%2Falbum.php%3Fsec%3Dfotos%26id%3D26. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [11] WWF, "Mediterranean Forests, woodlands and scrubs." [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190221105437/https%3A%2F%2Fwww.worldwildlife.org%2Fbiomes%2Fmediterranean-forests-woodlands-and-scrubs>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [12] J. M. Gil-Sánchez *et al.*, "The use of camera trapping for estimating Iberian lynx (*Lynx pardinus*) home ranges," *Eur. J. Wildl. Res.*, vol. 57, no. 6, pp. 1203–1211, 2011.
- [13] Iberlince, "Monte mediterráneo - Hábitat del lince." [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190221105947/http%3A%2F%2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Fmonte-mediterraneo-esp1%2Fhabitat-del-lince>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [14] "Datos AEMET." [Online]. Available: <https://datosclima.es/index.htm>. [Accessed: 18-Feb-2019].
- [15] Iberlince, G. López Zamora, and J. M. Sáez Muñoz, "Galería - Imágenes - Seguimiento." [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190222121431/http%3A%2F%2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Fgaleria-esp1%2Fimagenes%2Fcategory%2F5-seguimiento>. [Accessed: 22-Feb-2019].
- [16] Iberlince, "Visor del Proyecto Life+IBERLINCE." [Online]. Available: <https://iberlince.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=cabd0fcebcd947ac8d0c8c6afcd7b07e>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [17] J. F. Beltrán, "Ecología y conducta espacio-temporal del lince ibérico (*Lynx pardina*, T.) en el Parque Nacional de Doñana," Universidad de Sevilla, 1988.
- [18] L. Penabad, A. Rivas, and J. Calzada, "Ritmos de actividad del lince ibérico (*Lynx pardinus*) en cautividad," *Galemys, Spanish J. Mammal.*, vol. 24, no. August, pp. 57–63, 2013.
- [19] Iberlince, "Lince ibérico - Amenazas." [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190221111953/http%3A%2F%2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Flince-iberico-esp%2Famenazas>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [20] Iberlince, "Proyecto - Antecedentes." [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190224122201/http%3A%2F>

- %2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Fproyecto-esp%2Fantecedentes-esp. [Accessed: 24-Feb-2019].
- [21] Iberlince, “Proyecto - Objetivos.” [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190224123835/http%3A%2F%2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Fproyecto-esp%2Fobjetivos>. [Accessed: 24-Feb-2019].
- [22] R. M. Jackson, J. D. Roe, R. Wangchuk, and D. O. Hunter, *Surveying Snow Leopards Populations with Emphasis on Camera Trapping: A Handbook*, I. Sonoma, California: The Snow Leopard Conservancy, 2005.
- [23] Iberlince, “Lince ibérico - Distribución.” [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190225144022/http%3A%2F%2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Flince-iberico-esp%2Fdistribucion>. [Accessed: 25-Feb-2019].
- [24] R. Bagree, V. R. Jain, A. Kumar, and P. Ranjan, *Real-World Wireless Sensor Networks*, vol. 6511. Gandhinagar, India: Springer, 2010.
- [25] L. Maffei, E. Cuéllar, and A. Noss, “One thousand jaguars (*Panthera onca*) in Bolivia’s Chaco? Camera trapping in the Kaa-Iya National Park,” *J. Zool.*, vol. 262, no. 3, pp. 295–304, 2004.
- [26] Iberlince and J. V. Oropesa, “Galería - Imágenes - Lince ibérico.” [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20190225145049/http%3A%2F%2Fwww.iberlince.eu%2Findex.php%2Fesp%2Fgaleria-esp%2Fimagenes%2Fcategory%2F3-lince>. [Accessed: 25-Feb-2019].
- [27] A. F. O’Connell, J. D. Nichols, and K. U. Karanth, *Camera Traps in Animal Ecology*. Tokyo: Springer, 2011.
- [28] K. Weingarth, C. Heibl, F. Knauer, F. Zimmermann, L. Bufka, and M. Heurich, “First estimation of Eurasian lynx (*Lynx lynx*) abundance and density using digital cameras and capture-recapture techniques in a German national park,” *Anim. Biodivers. Conserv.*, vol. 35, no. 2, pp. 197–207, 2012.
- [29] “Datasheet del sensor de imagen.” [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AR0130CS-D.PDF>.
- [30] “Datasheet del sensor PIR.” [Online]. Available: [https://media.digikey.com/pdf/Data Sheets/Panasonic Electric Works PDFs/EKMB130611xK\\_Spec.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Panasonic%20Electric%20Works/PDFs/EKMB130611xK_Spec.pdf).

- [31] "Datasheet del fotoresistor." [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/LV0104CS-D.PDF>.
- [32] "Datasheet del LED." [Online]. Available: <https://www.lumileds.com/uploads/685/DS191-pdf>.
- [33] "Datasheet del transistor." [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NSS20201L-D.PDF>.
- [34] Wikipedia, "Link budget." [Online]. Available: [https://web.archive.org/web/20190606103406/https://en.wikipedia.org/wiki/Link\\_budget](https://web.archive.org/web/20190606103406/https://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget). [Accessed: 04-Apr-2019].
- [35] "Datasheet del módulo de comunicación por radiofrecuencia." [Online]. Available: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group3/bd/26/62/81/3d/86/4d/15/DM00339133/files/DM00339133.pdf/jcr:content/translations/en.DM00339133.pdf%0A>.
- [36] "Datasheet de la batería." [Online]. Available: <http://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf2/ACG4000/ACG4000C E298.pdf>.
- [37] "Datasheet del convertidor DC-DC." [Online]. Available: <https://www.torexsemi.com/file/xcl219/XCL219-XCL220.pdf>.
- [38] "Datasheet de la tarjeta SD." [Online]. Available: [https://media.digikey.com/pdf/Data Sheets/ATP Electronics PDFs/AFxGSD3A, AFxGUD3A.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ATP%20Electronics%20PDFs/AFxGSD3A,%20AFxGUD3A.pdf).
- [39] "Datasheet del panel fotovoltaico." [Online]. Available: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/SM531K10L.pdf>.
- [40] "Datasheet del  $\mu$ C." [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAMD21-Family-DataSheet-DS40001882D.pdf>.
- [41] "Datasheet de la lente." [Online]. Available: [http://www.marshall-usa.com/optical/lenses/ccd\\_cmos/43fix.php](http://www.marshall-usa.com/optical/lenses/ccd_cmos/43fix.php).
- [42] "Datasheet del soporte de la lente." [Online]. Available: [http://www.marshall-usa.com/optical/lenses/ccd\\_cmos/v-lh4.pdf](http://www.marshall-usa.com/optical/lenses/ccd_cmos/v-lh4.pdf).
- [43] Trailcampro, "Cámaras trampa para investigadores." [Online]. Available: <https://www.trailcampro.com/pages/camera-traps-for-researchers>. [Accessed: 01-Jun-2019].

[44] ComputerHoy, “Carcasas de móviles.” [Online]. Available: <https://computerhoy.com/noticias/moviles/branded--moto--plastico-cristal-metal-cual-es-mejor-tu-movil-69419>. [Accessed: 25-May-2019].